

Radiový KONSTRUKTÉR Svazarmu

Plánky a návody Amatérského radia



ROČNÍK III • 1957 • ČÍSLO 3

TECHNICKÉ ZNALOSTI A „NETECHNICI“

Není tomu dávno – před několika lety – když jsem o maturitní zkoušce dovedl vysvětlit princip vícefázových střídavých proudů, byl jsem uznán dospělým s poznámkou „prokázal při zkoušce dospělosti zvláštní znalosti“. Později se ovšem ukázalo, že ty znalosti byly zvláště nedostatečné. Cožpak je možné v době elektroniky, kdy elektronické přístroje suverénně vládou i těmi největšími motory, vystačit s povrchní znalostí základních fyzikálních dějů? V dobách, kdy jediným dopravním prostředkem byl kůň, byla samozřejmostí obecná znalost koní. Dnes už znalců koní není tolik; nezdá se však, že by na jejich místo nastoupila stejně obecná znalost elektřiny a elektroniky. Kolik našich známých přesto, že celý den poslouchají rozhlas, večer se dívají na televizní program, jezdí docela samozřejmě několikrát denně tramvají, používají předmětů, při jejichž výrobě spolupůsobily elektrony, kolik těch lidí z okruhu našich známých zná aspoň základní fakt, že elektrický proud musí téci někudy tam a někudy zpátky, to je v uzavřeném okruhu. A vliv elektroniky neustále poroste, stále širší bude zasahovat do našeho života. A kdyby došlo k ohrožení bezpečnosti našeho státu, pak by nebylo jediného občana, který by nepřišel do styku s těmi „tajemnými“ ději ve elektronických obvodech. Vždyť není takřka jediné zbraně, která by nevyužívala nejnovějších vymožeností tohoto mladého oboru. A všechna tato zařízení – ať pro mírovou potřebu, ať vojenská, musí obsluhovat lidé. Má-li být tohoto materiálu využito co nejhospodárněji, musí jej obsluhovat lidé, kteří mají pochopení pro jemná ústrojí elektro-

nických zařízení. Tu vystává jedna z hlavních úloh amatérů: propagovat znalosti elektroniky a radiotechniky, abychom měli co nejvíce lidí s tím jemným citem pro moderní techniku. Nejde o masovou výchovu odborníků s takovým stupněm znalostí, aby dovedli nová zařízení konstruovat nebo poškozená opravit. K tomu máme odborné školství. Jde však masově získat široký kádr lidí, jejichž vědomosti by stačily k obsluze elektronického zařízení. A tady už není hlavním předpokladem nějaká vrozená náklonnost k technice; tady se dají vychovat i naprostí „netechnici“. Musí se na ně ovšem „po jejich“, což znamená, že účinnou formou nemusí být zrovna kurs nebo přednáška. Duše muzikantská se na odbornou přednášku nenachytá; nachytá se však na nový hudební nástroj, na novou techniku hry. Mnohý z našich amatérů by se podivil, kdyby bylo možné statisticky zjistit, kolik propagace radiotechnických znalostí mají na svědomí na příklad elektrofonické kytary. Vyložíme-li, že změnou magnetického toku se budí ve vodiči proud, řekne to něco jenom člověku s vyvinutým technickým abstraktním myšlením. Když však vidím, že ocelová struna na kytarě vybudí v cívce proudy akustického kmitočtu, je to názorné a přesvědčivé. Vida, také jedna z forem, které mohou pomoci k plnění základního úkolu svazarmovských amatérů. A takových forem je mnoho; záleží na iniciativě a vynalézavosti našich radioamatérů, kolik těch cestíček „od lesa“ vymyslí, aby připravili pro případ potřeby co nejvíce občanů k plnění jejich úkolů v případě branného ohrožení republiky.

ELEKTRICKÉ HUDEBNÍ NÁSTROJE

Erich Schmalz

I. Principy.

Sdělovací technika je širokým oborem, zasahujícím do mnoha různých technických odvětví. Její principy pronikají i do zdánlivě nesouvisejících oborů, z nichž jedním jsou *hudební nástroje* [1].

Tento zásah si vynutil přirozený vývoj. Téměř všechny hudební nástroje jsou původem velmi staré a ve svých charakteristických vlastnostech již tak ustálené, že s nějakými podstatnějšími změnami již nelze počítat, a jejich vývoj končí tedy prakticky určitým ustrnutím. Tím jsou dány ovšem i hranice výrazovým možnostem hudebním a tedy obecně i dalšímu vývoji v tomto směru [2].

Výroba, lépe řečeno stavba hudebních nástrojů, byla donedávna záležitostí více méně umělecko-řemeslnou než technickou, a proto také vývojově zůstala za rychlým pokrokem techniky, nehledě k tomu, že mnohdy ani v individuálním pojetí nedovedla dosáhnout zvukových kvalit starých vzorů – viz na příklad Stradivariho housle. Dalším zásadním důvodem vývojové stagnace je vlastní *mechanická podstata* hudebních nástrojů, založená na zákonech akustiky, která sama o sobě je dosud nejméně probádaným fyzikálním oborem.

Za těchto okolností a rostoucích požadavků, kladených na hudební nástroje, je východiskem využití moderních způsobů výrobní techniky. Zvláště značně již vyvinuté sdělovací techniky, zejména *elektroakustiky* – zabývající se zvukem.

Charakteristické vlastnosti hudebních nástrojů jsou dány jejich konstrukcí a materiálovými vlastnostmi. Vyvíjely se – alespoň v hrubých rysech – spíše samovolně a byly přenášeny praktickými zkušenostmi starých mistrů stavby. Konstruovat nástroje, které by měly požadovaný a předem určený charakter zvuku, nebylo možné, poněvadž

se nikdo – až na výjimky u některých nástrojů – nezabýval podrobněji akustickými podmínkami vzniku a utváření hudebních tónů.

Moderní a technicky organizovaná výroba však již nemůže počítat pouze s přenášením starých mistrovských zkušeností a potřebuje konkrétnější podklady, které jsou schopny řešit pokročilé elektroakustické metody. Blízká budoucnost výroby hudebních nástrojů již tedy není tak záležitostí mistrů stavby jako spíše hudebních inženýrů [3].

Získávání zmíněných fyzikálních podkladů však není jediným z nových úkolů elektroakustiky. Mnohem širší pole působnosti se otevírá tomuto oboru ve zcela novém směru, v *umělé tvorbě tónů libovolného charakteru*. O zájmu o tento směr svědčí na příklad zpráva, že jedním ze čtyř problémů, jimiž se současně zabývá vývoj největšího světového koncernu pro slaboproudou elektrotechniku RCA (Radio Corporation of America) je právě elektronický generátor zvuku, umožňující věrné napodobení *jakéhokoliv* tónu [4].

Elektroakustika jako součást sdělovací techniky se zabývá hlavně přenosem, konservováním a *reprodukcí* zvuků již existujících. Podstatným rysem a problematikou nového směru je však vytváření nových zvuků, tedy jejich *produkce* v elektrických hudebních nástrojích [5].

Zde se dostáváme k hlavnímu problému. Zájem o elektrické hudební nástroje a jejich možnosti roste nejen u hudebníků a milovníků hudby, ale i u techniků. Je proto přirozené, že o nový obor se začínají i radioamatéři, což je slibné, neboť svou nadšenou prací pomohli již v mnohých oborech sdělovací techniky k urychlení vývoje, nehledě k tomu, že právě z řad radioamatérů se často rekrutují dobří odborníci-profesionálové.

V prvé řadě je třeba si správně ujasnit pojem „elektrický hudební nástroj“. Velmi často se mluví na příklad o elektrických varhanách a ne vždy se jedná

opravdu o elektrický hudební nástroj. Nešťastně vžitá terminologie totiž často nerozlišuje pojem „elektrizovaný“ a „elektrický“. V uvedeném případě se většinou jedná o normální píšťalové varhany, kde vzdušný proud je získáván elektrickým ventilátorem místo měchem poháněným šlapáním nebo ručně. Ještě častěji jsou takto označovány normální varhany s elektrickou trakturou, to jest přenášením pohybu klávesy na ventil vpouštějící vzduch do píšťaly. Tento přenos pohybu se totiž provádí také mechanicky – táhla, lanka – nebo pneumaticky – trubičkami, kterými je veden stlačený vzduch [6]. V těchto případech tedy jde o varhany elektrizované.

Správný pojem *elektrický hudební nástroj* znamená takový nástroj, kde tón vzniká nebo je alespoň zpracováván elektricky. V zásadě je tedy použito buď generátoru – zesilovače s filtry – a reproduktoru, nebo mikrofonu či snímače – zesilovače s filtry – a reproduktoru. Akustické děje, probíhající u klasických hudebních nástrojů, zde tedy probíhají elektricky a jsou proto mnohem snáze zvládnutelné.

Prakticky jsou elektrické hudební nástroje řešeny na základě tří principů – elektroakustického, elektrofonického a elektronického.

Elektroakustický princip využívá normálních (klasických) hudebních nástrojů, respektive zvuku, který v nich vzniká. Jde tedy o běžný akusticko-mechanický vznik tónu, na příklad chvěním struny, jazýčku, desky nebo vzdušného sloupce. Takto vzbuzený tón je zachycen mikrofonom – převeden na elektrické kmity, elektricky zesílen a případně charakterově upraven v zesilovači a převeden zpět na zvuk pomocí reprodukčního zařízení. Prakticky dosažitelným zesílením je tedy možno libovolně ovládat hlasitost a tím i dynamiku nástroje. Vedle toho je i do jisté míry možno měnit charakteristické zabarvení tónu (pomocí filtrů). Tento nejjednodušší princip dává normálnímu nástroji tedy již nové možnosti, kterých sám dosáhnout nemohl.

Elektrofonický princip vychází také ještě z mechanického chvění, i když ne již ze

zvuku v pravém slova smyslu (zvuku šířícího se vzduchem jakožto prostředím). Tón, správněji zde kmitočet, vzniká také chvěním struny, jazýčku, desky atd., ale není již použito mikrofonu, který by tón „slyšel“, ale snímače, který elektromagneticky, elektrostaticky nebo fotoelektricky mění přímo kmitavý pohyb tělesa v elektrické kmity – tedy podobně jako na příklad gramofonová přenoska mění chvění jehly na střídavé proudy. Tento princip dává kromě možností dynamických zejména velmi široké možnosti ve volbě barvy tónu. Vzniklé elektrické kmity jsou zesilovány a zpracovávány opět v zesilovači a reproduktorem pak měněny ve zvuk.

Elektronický princip vytváří tónový kmitočet již čistě elektricky, tedy bez pomoci akusticko-mechanického chvění. Základem je tedy nízkofrekvenční generátor, jehož kmitočtem je dána výška tónu a průběhem kmitu pak charakter – barva zvuku. Poněvadž zejména volba průběhu je u generátorů – zvláště ve spojení s filtry – velmi široká, dávají elektrické hudební nástroje, založené na elektronickém principu, nové, velmi bohaté možnosti. Ovládání dynamiky je samozřejmé a mimo to jsou poměrně snadno řešitelné mnohé hudební efekty, jako tremolo, vibrato a pod.

K jednotlivým principům se ještě podrobněji vrátíme. Dříve je však třeba si objasnit některé hodnoty, které se v běžné radiotechnické praxi nevyskytují – nebo jen zřídka – a které jsou vlastně přetlumočením hudebních požadavků na hodnoty technické.

II. Elektroakustické základy.

Při návrhu a řešení elektrického hudebního nástroje toho či onoho principu je nutno všechny technické možnosti co nejvíce přiblížit vlastnímu účelu – *základním požadavkům hudebním*.

S tohoto hlediska ještě ani dnes není názor hudebníků na elektrické hudební nástroje jednotný, zejména u nás, kde je tento obor a jeho možnosti ještě poměrně velmi málo znám. Nesprávným slučováním elektrických hudebních nástrojů s některými novými extrémními hudebními směry, jako třeba „Musique

Concrète“ jsou někdy příkře odsuzovány [7]. Přes to však pronikají nové nástroje stále více a více do všech hudebních oborů – viz na příklad velmi dobré zkušenosti známého rakouského varhaníka Karajana s elektronickými varhanami na slavnostních tradičních hrách v Salzburgu v roce 1954 [8].

Výrobci se zprvu snažili novými nástroji nahradit dosavadní. Proti novým varhanám stavěli varhaníci důkazy, že elektrický (elektrofonický nebo elektronický) nástroj neodpovídá zcela požadavkům obvyklým v klasických skladbách [9] a tudíž že lze mluvit nejvýše o nerovnocenné náhražce varhan píšťalových [10].

Rychlý vývoj spornou otázku – zvláště u varhan – řešil. Dosáhnout elektrickým řešením všech vlastností klasického nástroje je sice theoreticky možné, ale v některých detailech prakticky tak obtížné, že by jednoduššího a výrobně levnějšího řešení nebylo dosaženo. Na druhé straně však elektrické nástroje dávají některé možnosti u klasických nástrojů prakticky neproveditelné. Je to již zmíněné libovolné ovládání dynamiky, malé rozměry, přenosnost a malá váha, možnosti dodatečného umělého akustického přizpůsobení prostoru, podstatně nižší cena atd.

Elektrické „varhany“ se tedy vyvinuly v nový nástroj s novými hudebními možnostmi a jako takové se i uplatňují. Nejsou tedy již v pravém slova smyslu varhanami stejně jako není automobil motorovým kočárem, i když jeho počátky k němu směřovaly.

U řešení všech elektrických hudebních nástrojů je nutno respektovat hudební požadavky, ale není naprosto účelné se jako vzoru držet pouze ustálených forem daných normálními nástroji. Naopak pravým účelem návrhu a konstrukce je dát skladatelům a hudebníkům nové možnosti, které elektrické nástroje v tak bohaté míře poskytují.

Základní hodnoty vycházejí z *hudební teorie*. Ta je však stavěna pro potřeby vlastní hudby a abychom mohli její zákony aplikovat technicky, musíme je převést na srovnatelné hodnoty fyzikální

nauky o zvuku, tedy na hodnoty *akustické*, respektive *elektroakustické*.

Zvuk, který je v podstatě mechanickým pohybem hmoty, dělíme na *neperiodický*, vyznačující se nepravidelnými rozruchy jako jsou rány, vrzání, skřipání, šum atd. a na *periodický*, daný pravidelně se opakujícími kmity, tedy chvěním. V hudbě se vyskytující zvuky – tóny jsou tedy zvuky periodickými.

Hudební *výšce tónu* odpovídá akusticky *kmitočet* (počet kmitů za vteřinu), který je prvním základním *rozměrem zvuku*.

Jak známo, vnímá naše ucho jako souvislé slyšitelné tóny kmitočty v rozmezí asi 16 až 20 000 kmitů za vteřinu – Hz (Hertz je mezinárodně normalisovaná jednotka, je tedy správnějším označením než velmi často používaný cykl za sekundu, c/s). Udané hranice jsou ovšem průměrné, u různých lidí se částečně mění, stářím se horní hranice snižuje. Nižší kmitočty než 16 Hz vnímáme jako jednotlivé rázy, případně – nemají-li vyšších harmonických – nevnímáme je vůbec. Tyto nízké kmitočty nazýváme *infrazvukem*. Kmitočty vyšší jak 20 000 Hz – 20 kHz – jsou neslyšitelné a nazýváme je *ultrazvukem*.

Z pásma slyšitelných kmitočtů 16 Hz až 20 kHz je jako základních hudebních tónů využita jen část, a to od 16 Hz do asi 8 kHz. V těchto mezích se pohybují tónové rozsahy všech hudebních nástrojů.

Celkový rozsah hudebních tónů je rozdělen na 9 částí – *oktáv*, nazvaných podle psaných not a volených tak, že počáteční kmitočet jedné je $2 \times$ větší než počáteční kmitočet začátku oktávy předcházející. Takto *poměrově* je rozdělena ještě uvnitř každá oktáva na 8 stupňů – odtud název oktáva – avšak již ne ve stejném poměru 1:2, ale podle poměrů daných libozvučností – melodičností – vnímání za sebou následujících tónů. Tyto *přirozené* poměry (dané přirozenými vlastnostmi lidského sluchu) rozdělení jedné oktávy jsou uvedeny v tabulce I. Podle udaných poměrů lze přesně stanovit kmitočet jednotlivých stupňů – tónů v každé oktávě, které se označují obecně písmeny C, D, E, F, G, A,

H, C a pro přesnější určení oktávy pak takto:

Subkontra	${}^2C - {}^2H$
Kontra	${}^1C - {}^1H$
Velká	$C - H$
Malá	$c - h$
1 × čárkovaná	$c^1 - h^1$
2 × čárkovaná	$c^2 - h^2$
3 × čárkovaná	$c^3 - h^3$
4 × čárkovaná	$c^4 - h^4$
5 × čárkovaná	$c^5 - h^5$

Má-li na příklad nejhlubší tón 2C 16,5 Hz, najdeme kmitočet 2D násobným 9/8, tedy $16,5 \times 9/8 = 18,56$ Hz. V následujících oktávách jsou příslušné kmitočty $2 \times, 4 \times, 8 \times, 16 \times, 32 \times$ větší.

Takovým způsobem lze stanovit kmitočty všech tónů ve všech oktávách.

Je-li však počáteční tón stupnice jiný, na příklad G, nevyjdou kmitočty podle poměrů z tab. I. zcela stejně. Zjistíme, že kmitočet tónu A v G dur nesouhlasí s kmitočtem téhož tónu v C dur. Kdybychom takovým způsobem stanovili kmitočty všech dvanácti durových diatonických stupnic, zjistíme, že výšky tónů – tedy kmitočty – *nejsou absolutní*, že témuž tónu neodpovídá vždy týž kmitočet. A stejně je tomu i v dalších diatonických stupnicích mollových.

Podle této vlastnosti durových a mollových stupnic, že totiž kmitočet pro určitý tón není jednoznačný, nazýváme je *diatonické*, poněvadž tento systém je založen na *přirozených* – *čistě* vnímaných poměrech sluchových, označujeme jej jako *přirozené* neboli *čisté ladění*.

Toto ladění je velmi významné pro všechny nástroje, kde výška tónu je hu-

debníkem přímo vytvářena při hře – na příklad houslistou stisknutím struny na určitém místě. Výška tónu je zde totiž na základě přirozených poměrů sluchových hudebníkem snadno kontrolovatelná.

Naopak ale u všech nástrojů s danými tóny – tedy u nástrojů klávesových (piana, harmonia, varhany, harmoniky a pod.), kde výšku tónu hudebník měnit nemůže, činí kmitočtové nesrovnalosti mezi jednotlivými stupnicemi čistého ladění velmi značné potíže.

Pro klávesové nástroje bylo proto zavedeno uměle *vyrovnané* nebo *temperované* ladění, které se neřídí přesně přirozenými poměry sluchovými jak jsou uvedeny v tab. I. Trojí druh poměru – velký celý tón 9/8, malý celý tón 10/9 a velký půltón 16/15 – je nahrazen jediným poměrem – jednotným *temperovaným půl-*

tónem $\sqrt[12]{2}:1 = 1,05946:1$. Tentó poměr nahrazuje i malý diatonický půltón 25/24 (v tabulce I. neuvedený), jímž se celý tón zvyšuje nebo snižuje, na příklad F na FIS nebo G na GES.

Zavedením jednotného temperovaného půltónu bylo možno vytvořit jedinou universální stupnici *chromatickou*. Z ní lze vybrat všechny stupnice durové i mollové a každému tónu (půltónu) odpovídá vždy *jediný* přesně stanovitelný kmitočet, tedy *tóny v temperovaném neboli vyrovnaném ladění mají absolutní výšku*.

Kmitočty tónů chromatické stupnice stanovené ve všech oktávách na základě uvedeného poměru 1,05946:1 jsou sestaveny v druhém sloupci tabulky II. (otištěné na str. III. a IV. obálky). Subkontra 2C zde není, jak bychom

Tabulka I

Vzájemné poměry kmitočtů durové stupnice v přirozeném ladění

Poměry stupňů	1:2	2:3	3:4	4:5	5:6	6:7	7:8	
Poměry kmitočtů	9/8 1,125			9/8 1,125		9/8 1,125		Velký celý tón
		10/9 1,111			10/9 1,111			Malý celý tón
			16/15 1,067				16/15 1,067	Velký půltón

očekávali, 16 Hz, ale má 16,35 Hz. To vzniklo odvozením ze základního *normálního* tónu $a^1 = 440$ Hz. Tento tón je mezinárodně normalisován jako základ ladění, nazývá se *tónem normálním* a nahrazuje dříve používané tak zvané *komorní* $a^1 = 435$ Hz [11].

Vyrovnané – temperované – ladění, ač jeho poměry nejsou sluchově naprosto čisté (nepřirozené rozdíly rozezná jen citlivý hudební sluch), je pro klávesové nástroje tak podstatné, že by jejich vývoj byl sotva myslitelný.

Při řešení elektrických hudebních nástrojů má temperované ladění přirozeně také velký význam u všech typů klávesových (elektrofonické a elektronické varhany atd.), kde je nutno příslušné tóny vyrábět generátory. S čistým laděním se setkáváme u nástrojů elektroakustických, na příklad u kytar. Zde nejsou kmitočty vyráběny, ale jen zpracovávány a tudíž nepřichází v úvahu tak tónový kmitočet jako celý tónový rozsah nástroje, podle něhož musí být voleny podmínky celého zařízení.

Síla zvuku je dalším *základním rozměrem*. Hudebníci ji rozlišují v několika stup-

ních od velmi velmi slabého *piano-pianissima* do velmi velmi silného *forte-fortissima*. Fysikálně posuzujeme sílu zvuku jako *hlasitost* [12]. Jemně je odstupňována v jednotkách zvaných *fónech* (označení Ph). Poněvadž tyto jednotky odpovídají sluchovému vnímání síly zvuku, je i jejich stupnice volena podle hlasitosti některých známých srovnatelných zvuků (opět jako průměr z velkého počtu pozorování), jak je udáno v tabulce III. [13].

Sílu zvuku nevnímá náš sluch lineárně, ale *logaritmicky* – abychom určitý zvuk slyšeli ve dvojnásobné hlasitosti nestačí zdvojnásobit energii, která jej vyvolala, ale nutno ji zvýšit 10^2 , tedy $100 \times$ [14]. Proto také poměr zvýšení mezi jednotlivými stupni tabulky III. není $1 \times$, $2 \times$, $3 \times$ atd., ale $1 \times$, $10 \times$, $100 \times$, $1000 \times$ atd., tedy 1, 10, 10^2 , 10^3 , 10^4 až 10^{13} u hlasitosti 130 Ph. Vyplyvá z toho, že rozsah zvukové energie, kterou vnímáme jako hlasitost, je velmi široký. Poměr nejslabšího zvuku, který právě začínáme vnímat (prah slyšení 0 Ph) k nejsilnějšímu, který ještě sneseme (prah bolestivosti 130 Ph) je $1:10^{13}$, tedy jedna ku deseti bilionům.

Tabulka III Stupnice hlasitosti

Zvuk	Hlasitost H Ph	Poměr zvýšení
Práh slyšení	0	1
Velmi tichý šumot listí	10	10
Šeptání, tichá ulice	20	10^2
Tichá ulice za večera	30	10^3
Normální síla zvuku při rozpravě, bavení	40	10^4
Normální (pokojová) reprodukováná hudba	50	10^5
Hlasitá reprodukováná hudba	60	10^6
Frekventovaná ulice	70	10^7
Silně frekventovaná ulice, křičení	80	10^8
Hlasitá automobilová houkačka	90	10^9
Hluk nýtovačky	100	10^{10}
Zpracování ocelových desek pneumatickým kladivem	110	10^{11}
Hluk letadla ve vzdálenosti 4 m od vrtule	120	10^{12}
Práh bolestivosti	130	10^{13}

Sluch, podle jehož přirozených vlastností je volena stupnice hlasitosti, však není k vnímání všech slyšitelných kmitočtů stejně citlivý. Nejcitlivější je kolem 4000 Hz, u nižších a vyšších kmitočtů citlivost klesá, musí tedy být energie zvuku větší, abychom měli dojem stejné hlasitosti. Tyto poměry jsou zachyceny na tak zvaných Kingsburyho křivkách stejné hlasitosti [12] v diagramu na tabulce IV.

Křivky označené 0 Ph až 130 Ph představují hladiny hlasitosti v závislosti na kmitočtu vyznačeném na dolejší vodorovné stupnici v Hz. Z křivek lze na příklad vyčíst, že zvuk o hlasitosti 50 Ph odpovídá při kmitočtu 4000 Hz intenzitě asi 10^{-7} W/m^2 (levá strana sloupce *I*), avšak při kmitočtu 50 Hz je intenzita již 10^{-4} W/m^2 . Je tedy energie, potřebná k vybuzení zvuku o hlasitosti 50 Ph při 50 Hz asi $1000 \times$ větší než energie stejné hlasitého zvuku při kmitočtu 4000 Hz.

Vodorovné čáry diagramu udávají hladinu zvuku, úměrnou energii již vznikl, která je vyjádřena na pravé svislé stupnici v decibelech dB (někdy také v neperech N; $1 \text{ N} = 8,686 \text{ dB}$). Hodnoty hladiny zvuku dB jsou úměrné také intenzitě zvuku *I*, udané na levé svislé stupnici ve W/m^2 , a akustickému tlaku *p*, vyjádřenému na druhé levé svislé stupnici v mikrobarech μb (tlak a podtlak zhuštěných a zředěných vzdušných částic šířící se zvukové vlny).

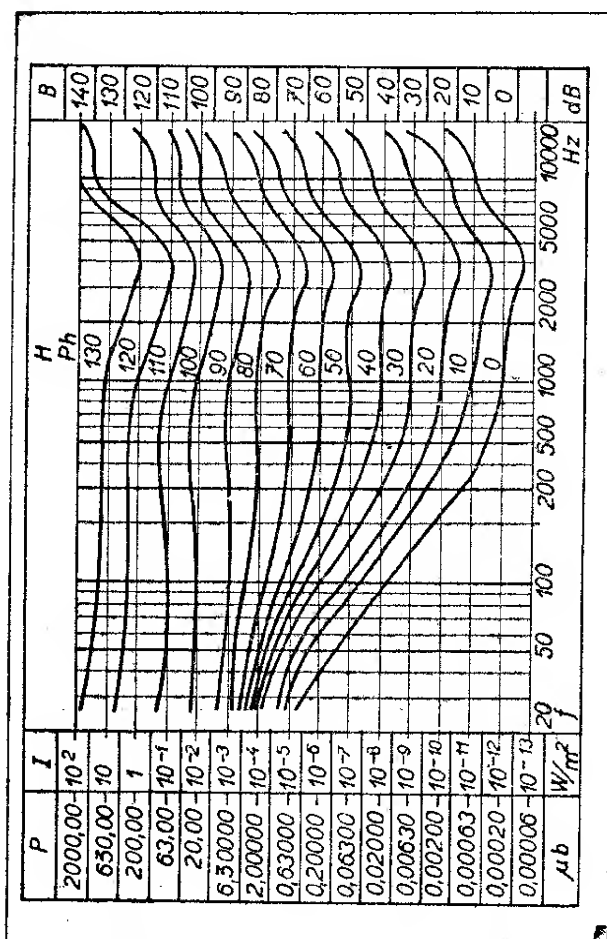
Mezi stupnicí hladin hlasitosti ve fónech a stupnicí hladin zvuku v decibelech a tudíž mezi oběma hodnotami je ten rozdíl, že prvá je proměnná závisle na kmitočtu, kdežto druhá je na kmitočtu nezávislá. Stejně hodnoty mají obě stupnice pouze při porovnávání neboli referenčním kmitočtu 1000 Hz. Přesný referenční kmitočet vysílá k měřicím účelům denně (mimo soboty) Čs. rozhlas ve 1401 hod. na stanici Praha I (638 kHz). Přesnost kmitočtu tohoto signálu je řádu 10^{-8} .

Síly hudebních zvuků můžeme tedy fyzikálně určovat nebo měřit (zvukoměry nebo hlukoměry) ve fónech – Ph, nebo s udáním příslušného kmitočtu (pro stanovení skutečné hlasitosti) ještě lépe v naprosto porovnatelných jednotkách,

v decibelech – dB. Tak je možno i konkrétně určovat dynamiku hudebních zvuků, t. j. poměr mezi nejslabším a nejsilnějším přednesem. Je-li dynamický rozsah nějakého hudebního nástroje na příklad 50 Ph, musíme s touto hodnotou počítat nad hladinou hluku, který je v místnosti hudební produkce, abychom nejslabší části piano-pianissimo ještě zřetelně vnímali. Průměrná hladina hluku je asi 35 dB a tak elektroakustické zařízení, jímž máme přenos tónů reprodukovat, musí být schopno zpracovat celý rozsah $35 + 50 = 85 \text{ dB}$ [15].

Druhý základní rozměr zvuku – hladina hlasitosti a hladina zvuku – dává hodnoty, důležité při řešení elektrického hudebního nástroje. U klasických nástrojů jsou tyto hodnoty, vlastně jejich rozmezí, již dány jako charakteristická vlastnost. U elektrických nástrojů je to veličina, s níž můžeme operovat – ovšem v možných a účelných mezích.

Tab. IV.

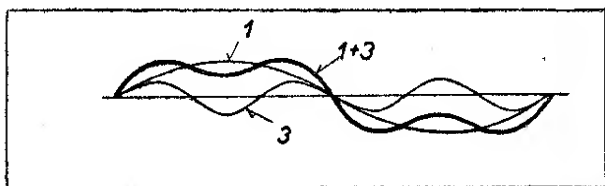


Charakter či barva je třetím základním rozměrem zvuku.

Je známo, že stejný tón, hraný na různých hudebních nástrojích, se rozeznatelně liší, i když jeho kmitočet je stejný. Rozdílnost spočívá v tom, že zvuk žádného hudebního nástroje není jen čistým sinusovým kmitočtem, odpovídajícím danému tónu. Je vždy směsí základního kmitočtu a dalších $2\times$, $3\times$, $4\times$ atd. vyšších. Je tedy zvuk tónu složen ze *základního* kmitočtu a *harmonických* nebo také *parciálních* (či *aliquotních*) tónů.

Součtem několika sinusových harmonických tónů (základní kmitočet je považován za prvou harmonickou) se tvar zvukové vlny podstatně mění – viz obr. 1, kde je sečten prvý a třetí harmonický tón. Takto zdeformovaný průběh zvukové vlny také ucho vnímá odlišně, a proto také tóny různých hudebních nástrojů rozeznáváme. Rozlišnost je dána obsahem vyšších harmonických, podle nichž je součtová výsledná vlna zdeformována. Příklady charakteristických vln tónu hraného na saxofon a klarinet jsou patrný z obr. 2 [14].

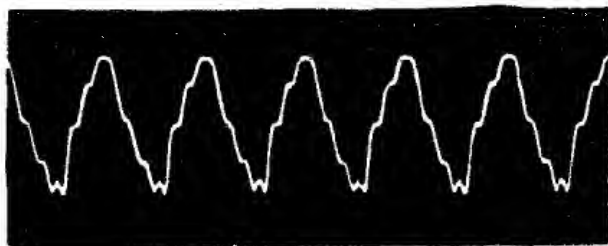
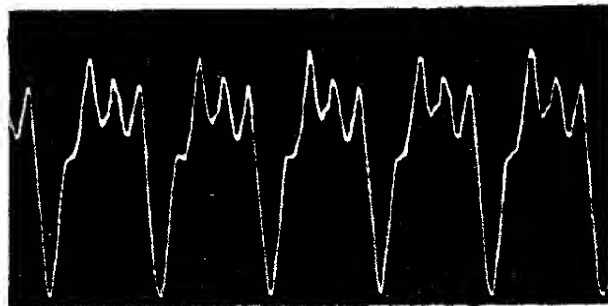
Jakkoliv složitý průběh zvukové vlny je možno rozložit – *analyzovat* – různými metodami na jednotlivé harmonické sinusové složky (kmity). Podobně je ale také možno z jednotlivých harmonických sinusových kmitočtů skládat, tedy *syntheticky* vytvářet *uměle* barvu zvuku. Synthetického vytváření barev – rejstříků – se u elektrických hudebních nástrojů používá velmi často. Má-li být napodoben zvuk některého známého nástroje – na příklad flétny nebo hoboje – zjistí se nejprve, které harmonické a s jakými amplitudami jsou obsaženy ve výsledném průběhu, který vidíme třeba na oscilogramu. Podle tohoto *zvukového spektra* se pak z jednotlivých sinusových kmitočtů jejich výběrem a nastavením amplitud uměle sestaví celkový průběh,



Obr. 1. Skládání první a třetí harmonické.

který je podle oscilogramu i poslechu velmi podobný originálu.

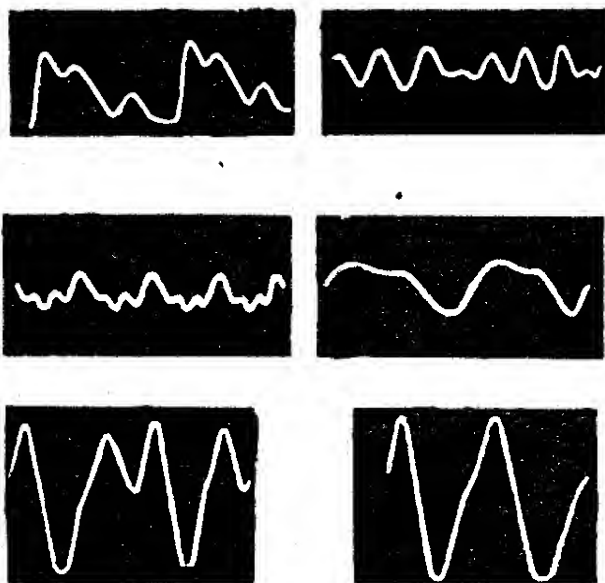
Avšak obsah vyšších harmonických (zvukové spektrum), který udává charakter určitého nástroje, není v celém jeho tónovém rozsahu stejný, proto se vždy udává pro určitý tón. Rozdíly v různých výškách jsou dosti značné, jak je patrné z oscilogramů těchto charakterů při různých kmitočtech na obr. 3. A to je právě příznačné pro osobitý výraz hudebního nástroje. U prvních elektrických hudebních nástrojů, kde se rejstříky vytvářely syntézou podle stejného poměru pro jakoukoliv výšku tónu, se barvy zvuku podobaly určitým nástrojům jen v určitých partiích a v celku zněly velmi uměle. Důkladnějším rozbořem bychom přišli na to, že v charakteristickém zvukovém spektru jsou některé harmonické stálé, tedy nemění se podle výšky tónu a jiné, které v různých výškách mají jiný poměr amplitudy k základnímu tónu. Těmto proměnným harmonickým říkáme *pohyblivé formanty*. Vedle nich bychom ještě našli v kterékoliv poloze tónového nástroje určité kmitočty nebo skupiny kmitočtů o stále stejné výšce – tedy bez ohledu na výšku základního tónu. Kmitočty těchto složek nejsou ani v určitém a celistvém poměru ke kmitočtu základního tónu, nejsou to tedy harmonické a říkáme jim *pevné*



Obr. 2. Průběh tónu saxofonu a klarinetu.

formanty. A ty zejména velmi silně určují charakter barvy tónu, pro snazší představivost bychom jim mohli říci „stálá zvuková příchut' nástroje“. Oblasti formant některých známých zvuků jsou patrné z diagramu na obr. 4 [16].

Avšak ani harmonické, ani formanty neurčují ještě zcela jednoznačně barvu zvuku. Záleží velmi také na *nakmitávacích a dokmitávacích* průbězích. Amplituda zvukové vlny u hudebního nástroje není časově stálá – na příklad u piana je tón nejsilnější (nejvyšší amplituda) ihned po úderu kladívka na strunu a pak postupně slábne, až zaniká. Naopak u varhan nebo harmonia je hlasitost tónu stále stejná – dokud je klávesa zmáčknuta, uvolněním klávesy tón náhle zanikne. V uvedených průbězích se však nejedná vždy jen o změnu celkové amplitudy, ale velmi často nastávají změny i v celkovém obsahu zvukového spektra, to znamená, že v okamžiku nasazení nebo zaniknutí tónu není obsah vyšších harmonických a formant stejný jako při trvalém tónu. I tyto skutečnosti je třeba v řešení elektrických hudebních nástrojů respektovat a to nejen při napodobování známých zvuků, ale i při tvoření nových zvukových barev. Tyto průběhy se řeší pomocí okruhů pro vytváření přechodových stavů, o nichž bude ještě dále zmínka.



Obr. 3. Průběh téže barvy zvuku při různé výšce tónu – rejstříky čelo, flétna a principál 8' při 110 a 440 Hz.

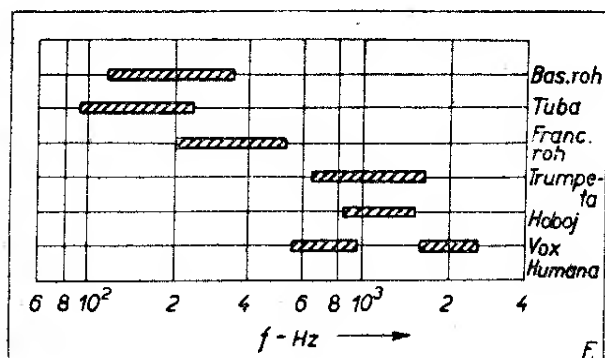
Vedle vlastní barvy zvuku, dané vyššími harmonickými, formantami a nakmitávacími s dokmitávacími průběhy, mají některé nástroje ještě zvláštní osobitý přednes, způsobený na příklad jemnějším nebo hlubším chvěním přednesu, tedy tremolem nebo vibratem.

Tremolo je periodické kolísání hlasitosti přednesu o střední hodnotě asi 7 změn za vteřinu. *Vibrato* má naopak stálou amplitudu, avšak asi se stejnou rychlostí se mění v malých mezích kmitočet tónu, lze jej tedy přirovnat ke kmitočtové modulaci, zatím co tremolo je amplitudová modulace. I těchto charakteristických efektů se u elektrických hudebních nástrojů velmi zhusta užívá.

III. Elektroakustické nástroje.

Nejjednodušším řešením elektrického hudebního nástroje je vlastně již pouhá hra do mikrofону. Použití *elektroakustického řetězce* mikrofón-zesilovač-reproduktor umožňuje prakticky neomezené ovládání hlasitosti přednesu a tím i dynamiky (zejména pokud se týče horní meze), jehož vlastní nástroj v žádném případě není schopen.

Této možnosti se využívá na příklad u varhan, kde širší ovládání hlasitosti je obtížné. Píšťaly totiž pracují se stále stejným tlakem vzduchu – změnami tlaku by se měnila i výška tónu – a větší hlasitosti se dá dosáhnout jen připojením dalších hry, tedy dalších píšťal. V malých mezích se hlasitost reguluje žaluziemi, jimiž se píšťaly více či méně zakrývají. Tak na příklad firma Andrews (USA) řeší otázku dynamiky tím, že u píšťal jsou



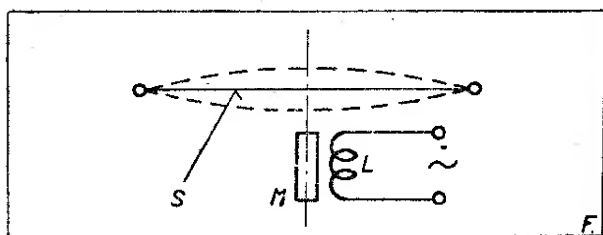
Obr. 4. Kmitočtové oblasti formant.

vhodně umístěny mikrofony a ovládání hlasitosti se provádí v zesilovači, takže z reproduktorů vycházejí zvuky libovolné požadované intensity [17].

Vedle zmíněných elektroakustických varhan se tohoto principu používá nejčastěji u harmonik. Zde má ještě – mimo zvětšení dynamického rozsahu – další podstatný význam, a to zlepšení kvality zvuku. Jazyčkové hlasy totiž vydávají vedle libozvučných harmonických a formant také značný obsah formant nelibozvučných, které velmi rychle rostou s rozkmitem, tedy hlasitostí. Čím se tedy hraje na harmoniku silněji, tím „plechovější“ zabarvení má přednes a naopak čím je tón tišší, tím čistější je zvuk.

Umístí-li se uvnitř nástroje vhodně mikrofón, pak lze ovládání hlasitosti přednesu provádět v zesilovači elektricky a hlasy nechat hrát při nejmenším rozkmitu. Znamená to ovšem změnu techniky hry – harmonikář je zvyklý ovládat dynamiku měchem – avšak výsledkem je jasnější a čistší přednes. Vedle toho zachytí mikrofón uvnitř nástroje také ještě další slabé složky, které při normální hře jsou utlumeny a jimiž je zvuk obohacen. Uvnitř umístěný mikrofón je také méně citlivý na vnější rušivé zvuky.

Takové nástroje vyrábí na příklad pod značkou Orgaphon firma Hohner (NSR). Uvnitř je ve vložce z pěnového polyuretanu (podobného mechové pryži) malý krystalový mikrofón, umístěný na kobylce doprovodní části. Je spojen s konektorem vedle basových knoflíků, na něž se napojí ohebný kablík vedoucí k zesilovači ve skřínce se dvěma velkými basovými reproduktory. Nastavení dynami-

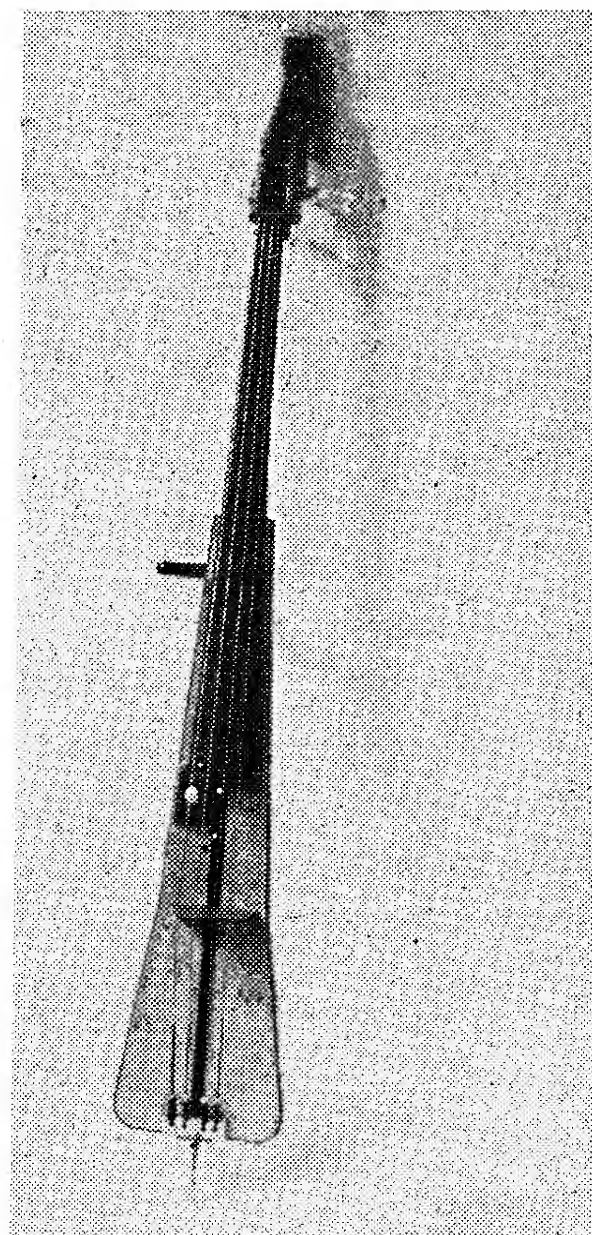


Obr. 5. Elektromagnetický snímač chvění struny.

ky se provádí normálně knoflíkem na zesilovači, podobně jako i tónové korekce (výšky a basy).

Zařízení dává velmi pěkný přednes, volba dynamiky knoflíkem je však nepraktická (hudebník má obě ruce zaměstnány) a nelze tedy řádně využít výhody elektrického ovládání hlasitosti při stálé slabé hře. Rovněž elektronické tremolo v zařízení chybí.

V principu je možno na elektroakustickou upravit každou harmoniku. Úpravu ovšem snese jen dobrý nástroj. U sta-



Obr. 6. Elektrofonická basa (Cremona, n. p. Luby u Chebu).

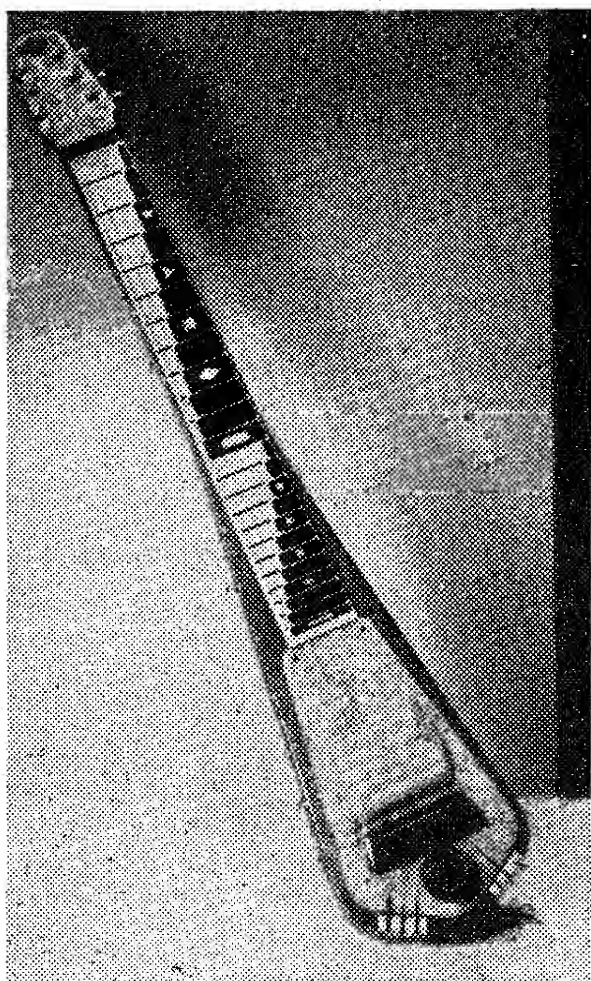
rých a nekvalitních harmonik, kde klapky a mechanika způsobují při hře hluk, se tento samozřejmě také snímá a hudba je pak doprovázena silným „stepováním“.

IV. Elektrofonické nástroje.

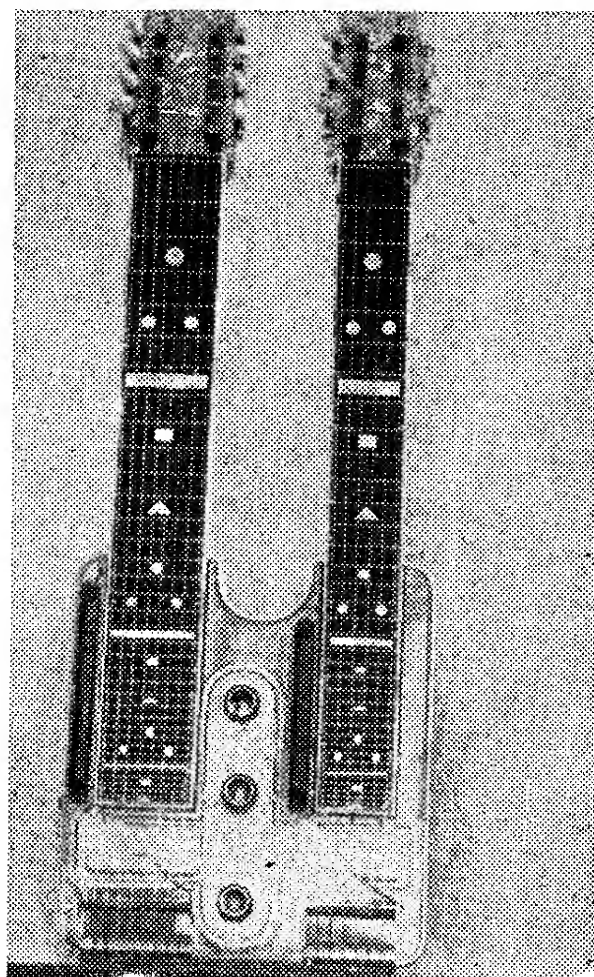
Elektrofonický princip vznikl aplikací známého původního Bellova telefonu. Místo lidským hlasem, který rozechvívá membránu, kmitá zde před permanentním magnetem M struna S a v cívce L se indukují střídavé proudy o kmitočtu tónu struny – viz obr. 5. Nepřevádí se tedy zde již zvuk na elektrické kmity, ale přímo mechanické kmity struny, která v tomto případě musí být přirozeně ocelová. Elektrické kmity ze snímače se dále zpracovávají v zesilovači a mění v konečný zvuk reproduktorem stejně jako u nástrojů elektroakustických.

Přímá přeměna mechanických kmitů v libovolně zesílitelné elektrické má pro nástroje podstatný význam. Samotnou strunou vydávaný zvuk je velmislabý, a proto musí mít strunné nástroje korpus – to jest ozvučnou skříň, jejíž resonancí se tón zesílí. U elektrofonických nástrojů toto zesílení obstará elektricky zesilovač a odpadá proto konstrukčně složitý korpus a celý nástroj je pak mnohem jednodušší. Dobře je to patrné ku příkladu u basy – normální nástroj je opravdu mohutný, naproti tomu elektrofonická basa je již skutečně „štíhlá“ (obráz. 6).

Ze strunných nástrojů se elektromagnetických snímačů užívá nejčastěji u kytar. Ukázka elektrofonické havajské kytary je na obr. 7. Celý nástroj je zde zredukován jen na rovnou desku, na níž jsou nataženy struny, snímač je umístěn pod vyvýšeným bílým krytem. Knoflí-



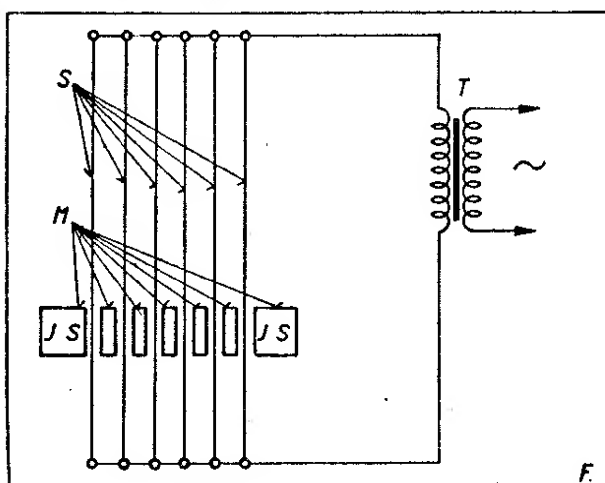
Obr. 7. Elektrofonická havajská kytara (Družstevní podnik Dřevokov, Blatná).



Obr. 8. Dvoukrká elektrofonická kytara (Cremona, n. p. Luby u Chebu).

kem se řídí potenciometr k nastavení požadované intensity přednesu. Jiné provedení elektrofonické kytary – tentokrát dvoukrké (6 a 8 strun) je na obr. 8.

Některé konstrukce elektrofonických kytar jdou tvarově tak daleko, že mimo



Obr. 9. Elektromagnetický snímač strun na principu páskového mikrofonu.

podobné techniky hry nemají se starou kytarou již nic společného.

Elektromagneticky lze však snímat zvuk i ze strun ne ocelových – avšak kovových – jak ukazuje obr. 9. Mezi kovovými strunami *S* jsou umístěny magnety *M* a spojené konce strun jsou připojeny na primár transformátoru *T*. Kmitající struny se pohybují v magnetickém poli a indukují se v nich střídavé proudy vedené k transformátoru, tedy tentýž princip jako u páskového mikrofonu.

Avšak i normální nástroje, opět nejčastěji kytary, se doplňují přídatným elektromagnetickým snímačem k dosažení lepších dynamických a barevných možností.

Vedle malých strunných nástrojů je elektromagnetického snímání použito i u elektrofonických pian, ku příkladu u křídla Neo-Nersten-Bechstein.

Elektromagnetického snímání lze použít dobře také u hlasových jazýčků. Nástroje, kde úderem nebo drnknutím ro-



Obr. 10. Elektrofonický klávesový nástroj (prototyp n. p. Harmonika, Louny).

zechvěný jazýček je elektromagneticky snímán se zejména v poslední době stále více a více uplatňují pro svůj nový barvitý charakter. Ukázka takového nástroje je na obr. 10. „Hluché“ elektrofonické nástroje mají výhodu v možnosti cvičení bez rušení okolí. Malý bateriový zesilovač, připojený na výstup, napájí sluchátka a hudbu slyší jen hrající. Může tak cvičit třeba v noci, neboť samotný nástroj bez snímání není téměř slyšitelný.

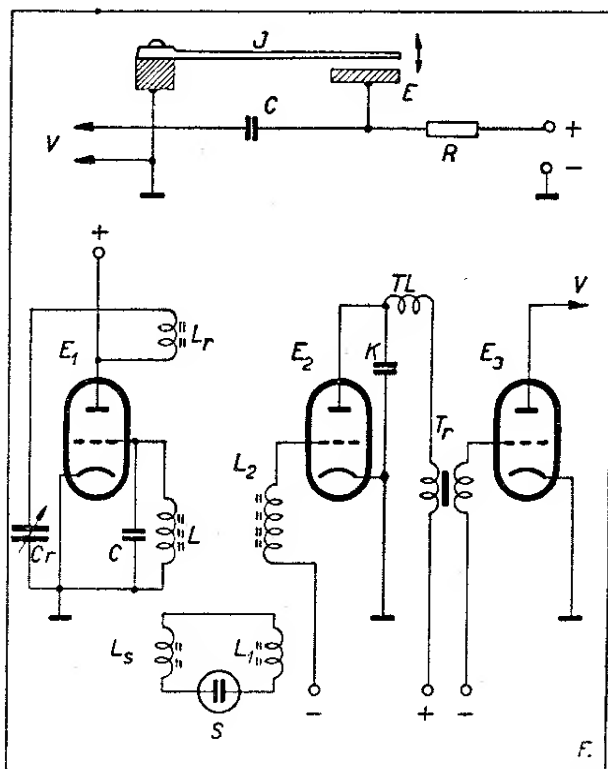
Vedle elektromagnetického systému se velmi často používá také snímání kapacitního, založeného na témže principu jako kondensátorový mikrofon – viz obr. 11. Pod jazýčkem J je umístěna elektroda E (pevná), napájená přes velký odpor – asi $100\text{ M}\Omega$ – stejnosměrným napětím asi 100 V . Tím vznikne na elektrodě stálý náboj a změnou kapacity mezi kmitajícím J a E vznikají změny napětí, které se odvádějí kondensátorem C na výstup V . Na tomto principu jsou založeny na příklad elektrofonické varhany Wurlitzer (USA), kde jsou jazýčky rozechvívány vzduchem – jako u harmonia. Harmonické na kmitajícím jazýčku mají rozkmit v různých

místech, je proto použito více elektrod E – sběrnic – a jejich vzájemným kombinováním se dosahuje různých zvukových barev – rejstříků.

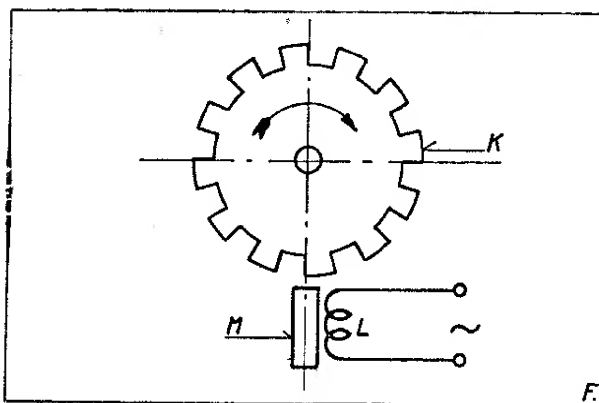
Poněvadž plocha a tím i kapacita, resp. její změny (zejména u strun) jsou malé, je možno použít také snímání vysokofrekvenčního, jehož principiální schema je na obr. 12. Elektronka E_1 pracuje spolu s L a C jako zpětnovazební oscilátor. Vysokofrekvenční kmity se indukují do vazební cívky L_s , z níž vedou přes kapacitní snímač S do cívky L_1 . Změnami kapacity snímače – které vzhledem k vysokému kmitočtu mohou být velmi malé – se procházející vysokofrekvenční proud moduluje. Elektronka E_2 – anodový detektor – demoduluje nízkofrekvenční kmity (zbytek v_f se odfiltruje na $TL-K$), které se pak zesílí v elektronce E_3 a vedou k dalšímu zpracování [18].

U některých nástrojů se kmity nesnímají přímo na kmitajícím zdroji, tedy struně, jazýčku atd., ale kontaktně na některé části resp. korpusu nástroje. Zde se převážně používá krystalových dotekových snímačů jako na příklad u foukacích harmonik a houslí. Dotekové snímače jsou však příliš citlivé na každý dotyk – třeba u foukací harmoniky jsou slyšet při hře i doteky jazyku.

Elektrofonický princip však nevychází jen z klasického kmitavého pohybu strun nebo jazýčků, ale i z pohybu rotačního, který není u normálních hudebních nástrojů naprosto obvyklý. Základem je zde *elektromagnetická siréna* (La Courvoisovo kolo) viz obr. 13.



Obr. 11. Princip kapacitního snímače.
Obr. 12. Vysokofrekvenční kapacitní snímání.



Obr. 13. Elektromagnetická siréna – La Courvoisovo kolo.

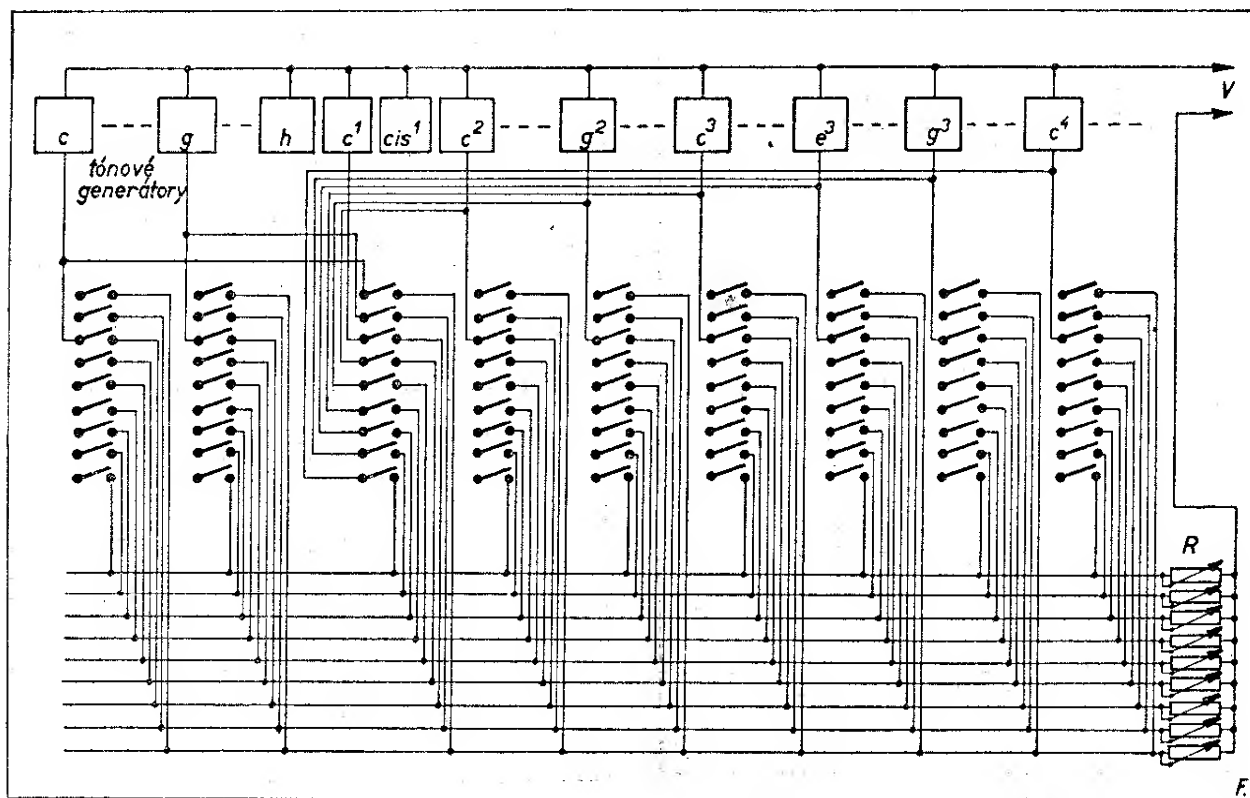
Železné ozubené kolečko K se otáčí proti pevnému magnetu M s cívkou L . Při otáčení kola přechází před magnetem střídavě zub a mezeru, tím se mění magnetické pole a v cívkě L se indukují střídavé proudy. Počet kmitů za vteřinu je dán počtem zubů, násobeným počtem otáček za vteřinu. Volbou počtu zubů můžeme tedy dosáhnout jakéhokoliv kmitočtu. Na tomto systému, který se ještě dodnes stále používá, byly založeny první elektrofonické varhany – a vůbec první elektrofonický hudební nástroj – a sice Cahillův „Dynamophon“. Tyto varhany byly předváděny v USA již roku 1906, ovšem tehdy jen na sluchátka, poněvadž nebyly ani reproduktory, ani elektronky. Přes to však varhany vážily 200 tun a zabíraly prostor střední stroje [19].

Dnešní elektrofonické varhany, založené na tomto principu, na příklad u nás známé značky Hammond (koncerty prof. Otty Čermáka) jsou poháněny synchronním motórkem, napájeným ze zvláštního stabilizovaného oscilátoru, aby byla zaručena přesnost otáček a aby bylo možno podle potřeby celé la-

dění poněkud zvýšit nebo snížit a přizpůsobit se k ladění jiných nástrojů v orchestru. Soustrojí, spojené síťovým rozbíhacím – startovacím – asynchronním motórkem, pohání ozubenými převody vzájemně spojenou skupinu dvanácti hřídelů, na nichž jsou vlastní rotační generátory – ozubená železná kola s elektromagnetickými snímači.

Poněvadž v temperovaném ladění je vzájemný poměr dvou sousedních půl-

tónů $1 : \sqrt[12]{2} = 1 : 1,05946$ (viz kapitola II), musí i ozubený převod mezi jednotlivými hřídelky odpovídat tomuto poměru. Velmi se mu blíží použitý poměr $89 : 84$ zubů $= 1 : 1,05952$. Rozdíl $0,00006$ odpovídá chybě $0,00566 \%$, která tónově činí asi $0,006 \%$ kmitočtu, což je přípustné proti právě slyšitelnému rozladění asi $0,02 \%$ f . Je-li na každém z dvanácti hřídelů ozubené kolečko o čtyřech zubech a otáčí-li se první rychlostí $8,175$ ot/s, dostaneme na prvním snímači $32,7$ Hz, na druhém $34,6$ Hz, na třetím $36,7$ Hz, na čtvrtém $38,9$ Hz atd., až na dvanáctém $61,7$ Hz, tedy tóny kontra oktávy ${}^1C - {}^1H$. Je-li na každém

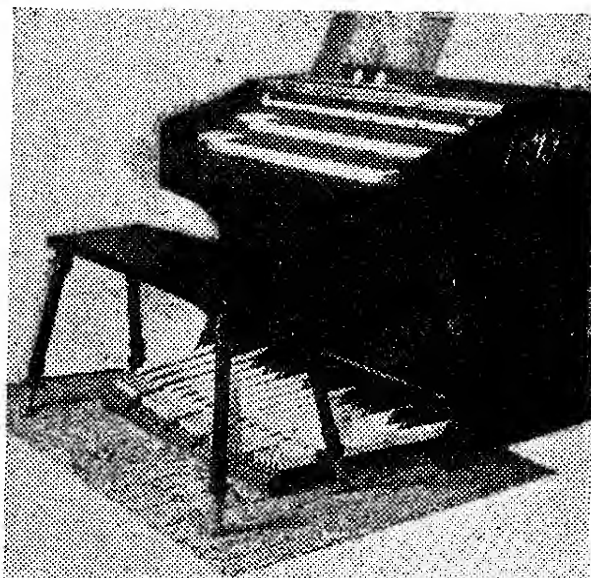


Obr. 14. Princip kombinování harmonických.

hřidélku další kolečko o 8 zubech, dávají příslušné kmitočty 65,4, 69,3, 73,4 až 123,5 Hz, tedy další oktávu C – H (velkou). Další kolečka o 16 zubech dávají celou malou oktávu c 130,8 Hz – – h 246,9 Hz, další kolečka o 32 zubech pak oktávu jednou čárkovanou atd., až do koleček po 256 zubech pro oktávu $4\times$ čárkovanou 2092,9 – 3951,2 Hz.

Na dvanácti hřidélkách, resp. na snímačích jejich ozubených rotorů, jsou tedy k dispozici všechny potřebné tónové kmitočty, které se pak klávesami (jimi ovládanými spinači) připojují na zesilovač. To je ovšem jen princip – popsané zařízení by dávalo jen jednotvárný zvuk. Ve skutečnosti jsou varhany řešeny tak, že pod každou klávesou – používá se dvou klávesnic – manuálů a ještě nožní klávesnice – pedálu – je celkem 9 kontaktů. Stisknutím jedné klávesy se tedy nezapíná jen jeden tón – jeden tónový generátor –, ale současně 9 tónů, t. j. vlastní zvolený tón jako základ, k tomu 2 subharmonické a 6 vyšších harmonických.

Na příklad stisknutím klávesy tónu c^1 - viz obr. 14, princip kombinování harmonických – se současně zapínají subharmonické g, c a dále harmonické c^2 (druhá), g^2 (třetí), c^3 (čtvrtá), e^3 (pátá), g^3 (šestá), c^4 (osmá). Sedmá harmonická, která je jak známo disonantní (nelibozvučná), je vynechána. Na obrázku 14 je schematicky naznačeno úplné zapojení kombinovaného devítinásobného spinače jen jedné klávesy – c^1 . Všechny ostatní klávesy, resp. jejich spinače, jsou zapojeny obdobně, na třetím spinači je vždy základní tón, na prvních dvou subharmonické a na čtvrtém až devátém vyšší harmonické. Spinače jsou zapojeny na společné sběrnice – dole na obrázku – které jsou ukončeny devíti regulačními odpory R. Tyto odpory se ovládají tahélky nad manuály, opatřenými stupnicí 0 – 8. Nastavením jednotlivých tahélek se tedy může určit poměr amplitud jednotlivých harmonických, případně některé vůbec vynechat – stupeň 0 – a tím se určuje *harmonickou syntésou* barva zvuku. Tak na příklad nastavení regulátorů do stupňů 0, 0, 6, 2, 7, 0, 5, 2, 0 dává barvu tónu podobnou klarinetu, kombinace 0, 0, 1, 4, 5, 4, 5,



Obr. 15. Elektrofonické varhany konstrukce O. Zachaře z Prahy.

4, 2 se podobá houslím 0, 1, 8, 7, 6, 1, 2, 1, 0 saxofonu a podobně.

Tím se ovšem určuje stálý poměr harmonických v celém použitém tónovém rozsahu. To ovšem neodpovídá zásadám barvy zvuku klasických nástrojů, kde se tento poměr s tónovou polohou mění – viz kapitola II., obr. 3. Vedle toho chybí i formanty jak pohyblivé, tak pevné a ani nakmitávací průběhy nejsou respektovány. Neodpovídají tedy elektrofonické varhany tohoto typu charakterem zcela nástrojům klasickým a přesný poměr harmonickým dává charakter umělého tónu. To však platí, pokud se týče rejstříkového napodobení určitých nástrojů. Systém ale dává veliké možnosti tvoření zcela nových charakterů – popsaná kombinace umožňuje theoreticky skoro dva miliony různých obměn. Uplatňují se proto takové varhany mnohem více pro nové formy moderní hudby než pro instrumentálně konservativní hudbu klasickou.

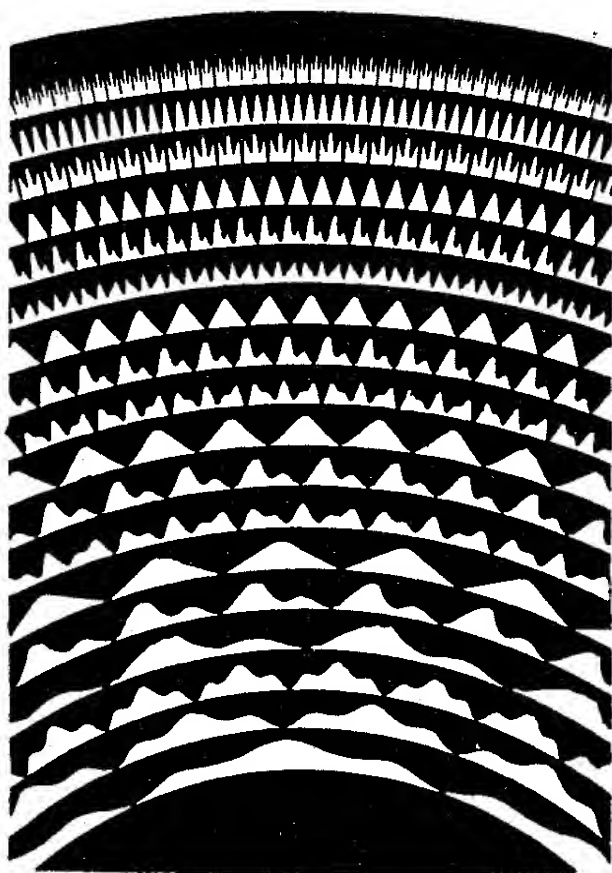
Další podrobnosti o elektrofonických varhanách tohoto systému jsou uvedeny ve II. ročníku Amatérského radia [20].

Poněvadž při harmonické syntéze je nutno skládat požadovaný průběh ze sinusových kmitů, musí i elektromagnetické generátory takové kmitů vyrábět. Tvar vzniklého napětí záleží na tvaru zubu a snímače. Musí tedy být zuby vel-

mi přesně provedeny a přesto je ještě nutno použít opravných elektrických obvodů.

Přesnost zubů a bezhlučný a tichý chod celého zařízení klade velké nároky na konstrukci. Ač na prvý pohled se princip s elektromagnetickými sítěmi zdá celkem jednoduchý, je ve skutečnosti jak po stránce mechanické tak elektrické velmi náročný. U nás postavil velmi dokonalý model takovéhoto varhan Oldřich Zachař z Prahy – viz obr. 15.

Některé firmy, na příklad anglická Compton, staví elektrofonické varhany s otáčivými rotory, avšak se snímáním statickým. Proti zubům – výstupkům – kovového kolečka stojí pevná elektroda, napájená přes velký odpor vysokým stejnosměrným napětím. Otáčením kolečka se střídavě přechodem výstupků a mezer mění kapacita a na výstupním kondensátoru – obdoba obr. 11 – vzniká střídavé elektrické napětí.



Obr. 16. Část transparentního kotouče fotoelektrických varhan (Welte, NSR).

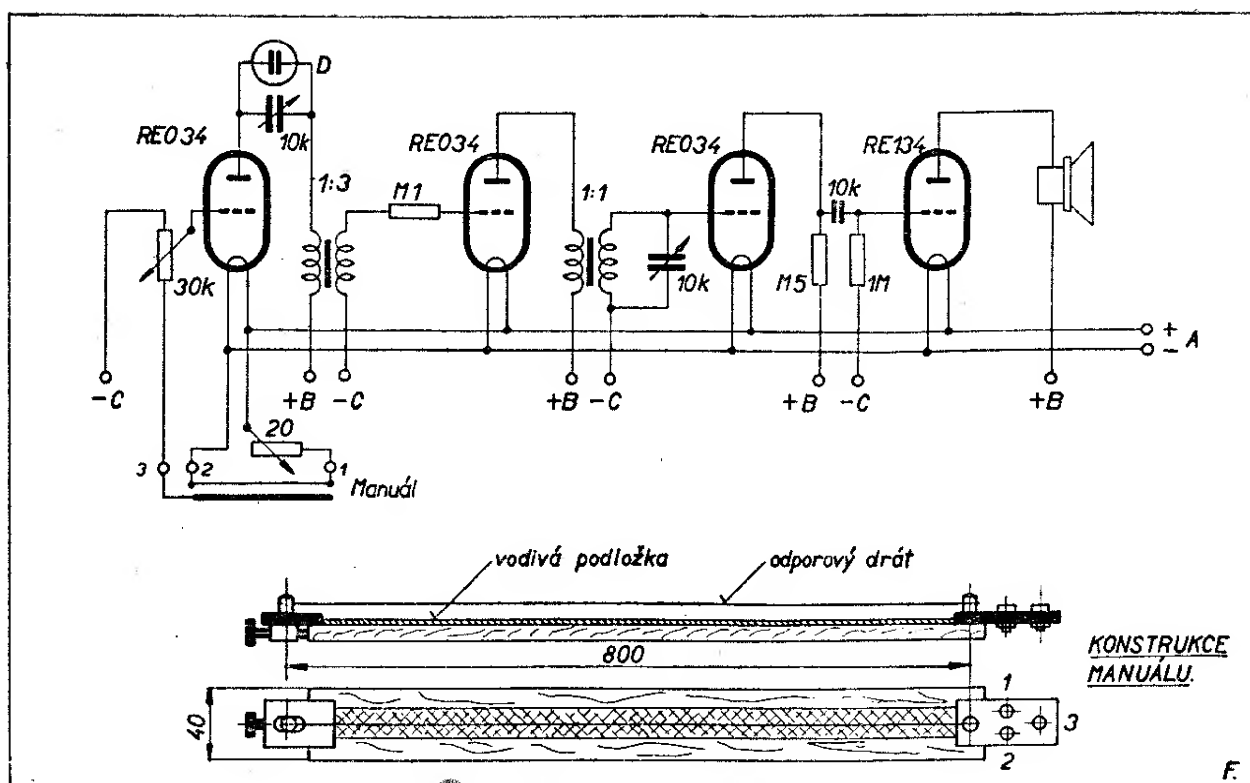
Rotorové varhany je možno řešit také fotoelektricky. Tak u systému Welte [21] je použito transparentních kotoučů – část takového kotouče je na obr. 16. Černobílé značky jsou prosvětlovány úzkým světelným paprskem, dopadajícím na fotočlánek, jehož proudy (modulované značkami na kotouči) jsou pak vedeny k zesilovači. Klávesami se otevíraly clonky, propouštějící světlo na příslušné značky. Rejstříky se u tohoto systému netvořily harmonickou syntesou, ale použilo se přímo příslušného tvaru značek na kotouči. Z obr. 16 je patrné, že pro každý tón jsou k dispozici značky různých tvarů. Tento typ nástroje se dnes již neuplatňuje.

Zajímavým způsobem byl také řešen elektrofonický systém, kde jednotlivé tóny byly natočeny na gramodeskách a snímaly se přenoskami ovládanými klávesami. Podobným způsobem byl navržen i patent udělený u nás již asi v roce 1920.

V. Elektronické nástroje.

Elektronický princip je ze všech dosud uvedených nejrevolučnější. Nevychází ani ze zvuku, ani z mechanického pohybu, ale vyrábí tónové kmitočty čistě elektricky, tedy jen pomocí elektronických oscilátorů. Poněvadž je tento princip i s hlediska radioamatérského nejzajímavějším, probereme jej podrobněji.

Snaha vytvářet zvukové kmitočty čistě elektricky je již velmi stará. Prvým, prakticky také upotřebeným nástrojem tohoto typu bylo Trautweinovo řešení, tak zvané *Trautonium* asi z roku 1932. Úplné schema tohoto původního řešení je na obr. 17 [22]. Tónový kmitočet – pilovitého průběhu – zde vzniká v relaxačním okruhu složeném z doutnavky D , kondensátoru 10 000 pF a odporu, zastoupeného vnitřním odporem prvku elektronky RE034. Předpětí této elektronky je zhruba nařizováno odporem 30 k Ω a jemně se řídí přitlačením odporového drátu manuálu na vodivou podložku. Podle místa, kde se prstem drát manuálu stiskne, dostává elektronka větší či menší předpětí a je tedy také její vnitřní odpor větší či menší a podle toho se také mění kmitočet – výška tónu celého oscilátoru. Tónová poloha ma-

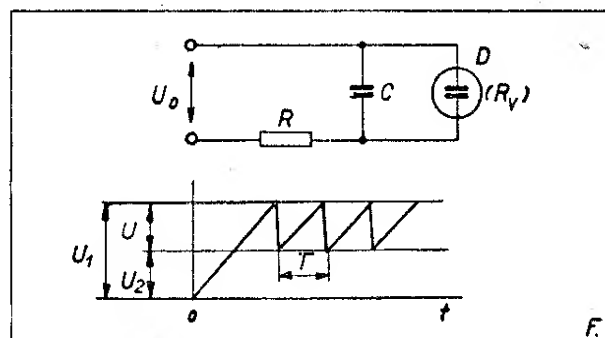


Obr. 17. Schema původního Trautonia.

nuálu se nastavuje proměnným odporem 20Ω . Tónový kmitočet se zesílí v druhé elektronce RE034 a na převodním transformátoru ke třetímu stupni se upraví otoč. kondensátorem $10\,000 \text{ pF}$ jeho barva – odřízne se část harmonických. Na nástroj se přirozeně hrálo jen monofonně, t. j. jednohlasně, neboť oscilátor může současně kmitat jen na jednom kmitočtu. Charakter zvuku Trautonia je podobný strunným nástrojům a také se na něj hraje v tóninách čistého ladění. Na manuálu nelze přesně označit místa jednotlivých tónů, hudebník podobně jako u hry na housle tiskne prst za současné sluchové kontroly ladění. Pro značně efektní přednes byly tyto nástroje – ve zdokonaleném provedení – vyráběny i seriově (firma Telefunken).

Princip relaxačního doutnavkového generátoru je na obr. 18. Plynová výbojka – doutnavka – má jak známo zajímavou vlastnost. Stoupá-li na jejích elektrodách napětí, začne propouštět proud až od určitého bodu – zápalného napětí, při němž se rozsvítí. Naopak snižujeme-li napětí, bude doutnavka svítit ještě i pod

napětím zápalným a teprve u jiného bodu – zhasacího napětí – zhasne, přestane propouštět proud. Přivádíme-li na doutnavku, resp. její elektrody proud přes odpor R , viz obr. 18, paralelně k elektrodám připojíme kondensátor C , pak za určitých podmínek začne doutnavka blikat – kmitat. Napájecí napětí U_0 musí být o něco větší než zápalné napětí U_1 . Hodnota odporu R je volena tak, aby na něm vznikl napěťový spád tak velký, aby napájecí napětí U_0 bylo menší než zápalné U_1 . Poněvadž doutnavka v tomto stadiu proud nepropouští, nabíjí se



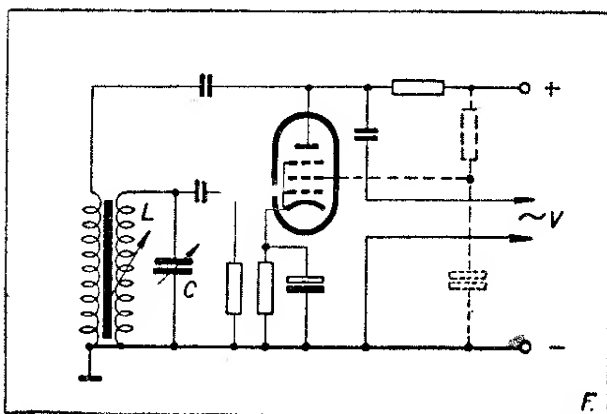
Obr. 18. Doutnavkový oscilátor.

pozvolna kondensátor C . Jakmile jeho napětí stoupne až na U_0 , - za jak dlouho, to záleží na velikosti odporu R a kondensátoru C - v tom okamžiku doutnavka zapálí, napětí kondensátoru se vybije až na hodnotu zhasacího napětí U_2 . Zhaslá doutnavka opět nepropouští proud a kondensátor se tedy znovu nabíjí až nastane nový výboj. Napětí na kondensátoru tedy stoupá a klesá podle pilovitého průběhu na obr. 18 mezi hodnotami U_1 a U_2 , pilovité napětí má tedy hodnotu U , která je rovna rozdílu zápalného napětí U_1 a zhasacího napětí U_2 , tedy $U = U_1 - U_2$. Kmitočet takového oscilátoru je dán výrazem [23]:

$$f = \frac{1}{R \cdot C \cdot \ln \frac{U_0 - U_2}{U_0 - U_1} + R_v \cdot C \cdot \ln \frac{U_1}{U_2}}$$

[Hz; Ω , F, V].

Jak je ze vzorce patrné, je kmitočet doutnavkového oscilátoru závislý nejen na hodnotách R a C , ale také na vnitřním odporu doutnavky R_v a na zápalném a zhasacím napětí. Poněvadž nejen všechny doutnavky stejného typu nemají tyto hodnoty stejné, ale hodnoty se mění s teplotou a stářím i u jedné doutnavky, nejsou tyto relaxační generátory pro vytváření hudebních tónů vhodné. U nástrojů, jako bylo Trautonium a dalších podobných, to celkem nebylo na závadu, poněvadž se tónová nestabilita vyrovnala sluchovou kontrolou při nasazení tónu - chyba se napравила posunutím polohy prstů.

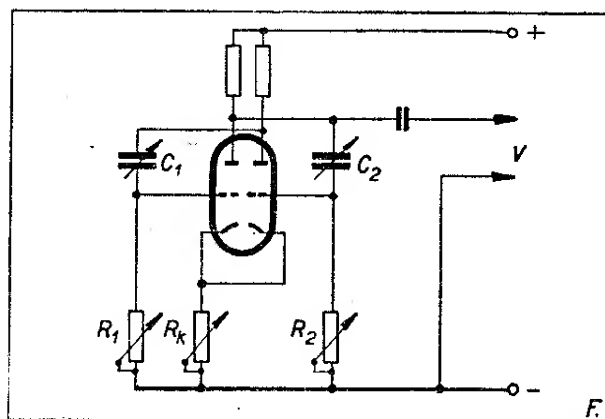


Obr. 19. Zpětnovazební LC oscilátor

Náročné vyhledávání tónu správnou polohou prstu na manuálu nástrojů typu Trautonia bylo brzy nahrazeno klaviaturou, kde stisknutím klávesy zapojil pod ní umístěný spínač určitou předem nastavenou velikost odporu odpovídající výšce požadovaného tónu generátoru. Zde již kmitočtovou nestabilitu doutnavkového generátoru nebylo možno dodatečně napravovat, poněvadž ladící členy, odpory, byly pevně nastaveny. Přestalo se proto (jinak svou jednoduchostí lákavého) doutnavkového generátoru používat a byl nahrazen různými typy elektronkových oscilátorů.

V zásadě je možno použít jakéhokoli nř oscilátoru, při čemž se dbá toho, aby vyráběné kmity byly sinusové a bylo možno skládáním harmonických (odvozuji se ze základního kmitočtu v dělicích nebo násobičích) vytvářet synteticky různé barvy tónů. V jiných systémech se vytvářejí kmity s co možno největším obsahem harmonických, tedy nejlépe pilovité, které se pak ve filtrech upravují na různé průběhy. Prvé metody se u jednooscilátorových monofonních nástrojů používá velmi málo - na příklad Hammondův Solovox [24] - vrátíme se proto k ní podrobněji až u nástrojů polyfonních (typu varhan), kde je naopak velmi rozšířena.

Pro jednohlasý monofonní nástroj je tedy třeba oscilátoru, který vyrábí kmity pokud možno se skresleným průběhem. Použije-li se normálního zpětnovazebního LC oscilátoru - obr. 19 - dá se původní sinusový kmitočet značně skreslit na příklad těsnou vazbou zpětnovazeb-



Obr. 20. Multivibrátor.

ního transformátoru nebo snížením napětí stínící mřížky – je-li použito pentody – až skoro na pravoúhlé kmity s velkým obsahem lichých harmonických. Oscilátorů typu LC se používá (příklady některých vyráběných nástrojů budou uvedeny dále) zejména pro poměrně snadno dosažitelnou stabilitu kmitočtu, který je zde závislý hlavně na členech L a C a nechá se proto poměrně snadno udržet. Kmitočet oscilátoru je určen vztahem:

$$f = \frac{10^3}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz}; \text{H}, \mu\text{F}].$$

U nástroje se změna tónu provádí nejčastěji změnou kapacity, jejíž příslušná velikost se připojuje klávesovým spínačem.

Ještě častěji se používá multivibrátorů, poněvadž z jejich pilovitých kmitů lze rejstříkovými filtry získat velmi rozmanité tónové barvy. Původní Blochův multivibrátor – viz obr. 20 – má určitou nevýhodu v tom, že změna kmitočtu závisí na dvou skupinách součástek $R_1 C_1 - R_2 C_2$. Pro volbu různé výšky tónu je proto třeba měnit současně kapacity dvou kondenzátorů nebo velikosti dvou odporů, což je konstrukčně nevýhodné. Změnou jen jednoho prvku se sice kmitočet také mění, ale s ním i amplituda a případně i tvar kmitu. Poněvadž je kmitočet tohoto oscilátoru velmi závislý také na zisku elektronky, lze jej měnit také velikostí odporu R_k , jak je provedeno na příklad v Bronštejnově Elektrolině [25], jejíž schema bylo uvedeno také v Amatérském radiu [26].

Závislost na zisku (A) a tedy vnitřních hodnotách elektronky je patrna ze vzorce pro výpočet kmitočtu multivibrátoru [27]:

$$f = \frac{A}{2(A+1)} \cdot \frac{1}{CR} \quad [\text{Hz}; \text{F}, \Omega].$$

Vztah platí za předpokladu, že zisk obou elektronek (systémů) A je stejný a také odpory a kondensátory jsou stejné, tedy $R = R_1 = R_2$ a $C = C_1 = C_2$. Při nesterétném zisku obou systémů elektronky A_1, A_2 platí:

$$f = \frac{1}{RC} \cdot \left(\frac{A_1 \cdot A_2}{A_1(A_2 + 1) + A_2(A_1 + 1)} \right) \quad [\text{Hz}; \Omega, \text{F}].$$

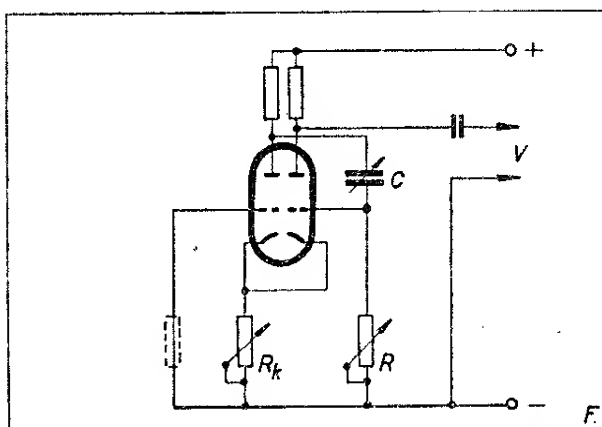
Závislost kmitočtu na vnitřních hodnotách elektronky, které nejsou stejné u téhož typu a časem se mění (stárnutí) i u téhož kusu je nevýhodou multivibrátoru.

Je proto třeba u nf oscilátorů používat v první řadě stabilizovaného napětí, u multivibrátorů pak pokud možno výběrových elektronek a případně také okruhů, které změny vnitřních hodnot stabilizují. U továrně vyráběných nástrojů se nejčastěji používá *katodově vázaného* multivibrátoru podle principu na obr. 21, jehož kmitočet lze přibližně určit vztahem [28]:

$$f \doteq \frac{1}{4RC} \quad [\text{Hz}; \Omega, \text{F}].$$

V uvedeném *informativním* vzorci sice není uvedena závislost na zisku elektronky, ve skutečnosti však závislost je u všech multivibrátorů. Mnohem větší stability kmitočtu a menší závislosti na hodnotách elektronky se dosáhne, dostane-li mřížka druhé elektronky kladné napětí, odpor R tedy není připojen na zem, ale na plus pól anodového napětí [29].

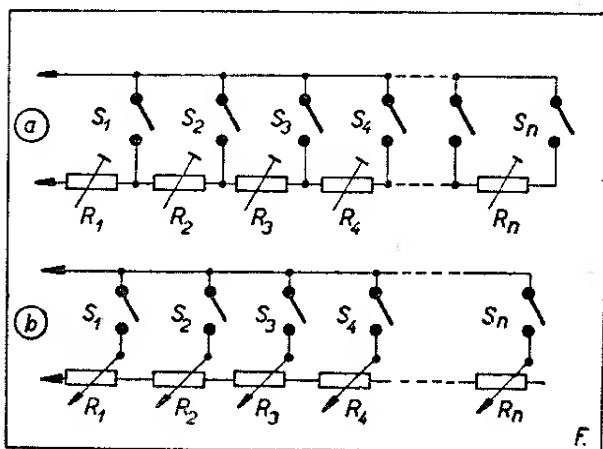
Je možné ovšem použít i jiných z různých typů nf oscilátorů, na příklad rázujícího (blocking) oscilátoru (jako u časové základny osciloskopu), transitronu, fan-



Obr. 21. Katodově vázaný multivibrátor.

tastronu atd. – zde jsou právě velmi široké experimentální možnosti pro amatérskou praxi.

Volba výšky tónu – klávesovým spínačem – je řešena nejčastěji nastavenými odpory, nebo – u systému LC – kondensátory. Aby nebylo třeba pro každý jednotlivý tón nařizovat vždy celou hodnotu odporu, zapojují se „hrací“ odpory součtově, viz obr. 22a. Zavřením spínače S_1 je zapojen do okruhu jen odpor R_1 , který je nastaven na kmitočet nejvyššího tónu klaviatury. Spínač S_2 zapojuje do okruhu v serii odpor $R_1 + R_2$, součet těchto odporů určuje kmitočet o půl tónu (temperovaného) nižší, který je přesně nastaven odporem R_2 . Podobně stisknutím na př. spínače S_4 se zapojí do okruhu serie odporů $R_1 + R_2 + R_3 + R_4$, jejichž součtová hodnota dává kmitočet tónu na čtvrté klávese zprava – přesně opět doladěno odporem R_4 . Spínačů a odporů je tolik, kolik kláves je v klávesnici použito. Zavřením posledního spínače S_n se zapojuje součet všech odporů $R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots + R_n$, tedy největší hodnota odpovídající nejhlubšímu tónu – poslední klávese vlevo – doladěnému odporem R_n . Toto zapojení má jednu nevýhodu. Je-li třeba případně později doladit některý tón, na příklad R_3 , nezmění se sice předchozí tóny na R_1 a R_2 , ale toto doladění rozladí všechny následující tóny R_4 až R_n . Je proto mnohem výhodnější zapojení potenciometrů podle obr. 22b, kde je možno kterýkoliv tón dodatečně doladit, aniž by se narušilo ladění ostatních.



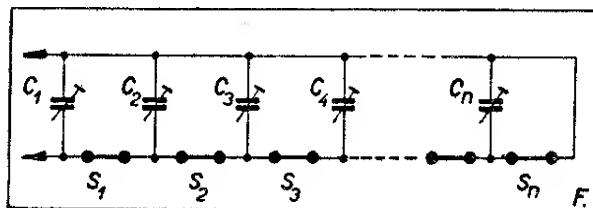
Obr. 22. Řazení tónových odporů.

U systému, kde je použito oscilátoru typu LC , se nejčastěji nastavují výšky tónů kondensátory. Aby nebylo třeba používat příliš velkých a směrem k hlubším tónům se zvětšujících hodnot, je použito opět metody součtové, při níž je však třeba spojovat kondensátory paralelně. Princip tohoto klíčování je naznačen na obr. 23. Všechny spínače jsou v klidové poloze zavřeny, okruh je tedy spojen do krátka. Stisknutím klávesy nejvyššího tónu se rozpojí spínač S_1 , tím je do okruhu zapojen jen kondensátor C_1 , naladěný na příslušný tón. Rozevřením klávesy S_2 se zapojí do okruhu paralelně kondensátory $C_1 + C_2$, jejichž součet určuje kmitočet dalšího nižšího tónu přesně doladěného kapacitou C_2 . Podobně je tomu u všech dalších spínačů, až rozevřením posledního S_n jsou zapojeny paralelně všechny kondensátory od C_1 do C_n a jejich celková hodnota odpovídá nejhlubšímu tónu klávesnice, který je opět správně nastaven posledním kondensátorem C_n .

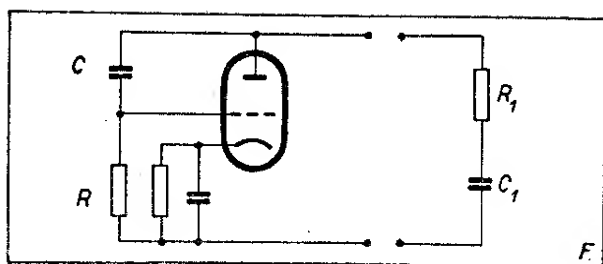
Vzhledem k poměrně nízkým kmitočetům vycházejí hodnoty nastavitelných kondensátorů, i když se jejich kapacita přičítá, poměrně dosti velké (řádu nanofaradů), které se dosti nesnadno nastavují. Zde je možno také použít pomocného zapojení s reaktanční elektronkou – viz obr. 24, která umožňuje použít malých, snadno naladitelných trimrů nebo doladovacích kondensátorů, zhotovených navinováním izolovaného drátu na silnější holý drát. Malé hodnoty těchto kondensátorů znásobí elektronka na požadovaně velkou hodnotu. Výsledná kapacita reaktančního zapojení [30] je dána součinem kapacity, odporu a strmosti elektronky, tedy:

$$C_1 = C \cdot R \cdot S \quad [F; \Omega, A/V].$$

R_1 značí ztráty, které jsou tím menší,



Obr. 23. Řazení tónových kondensátorů.

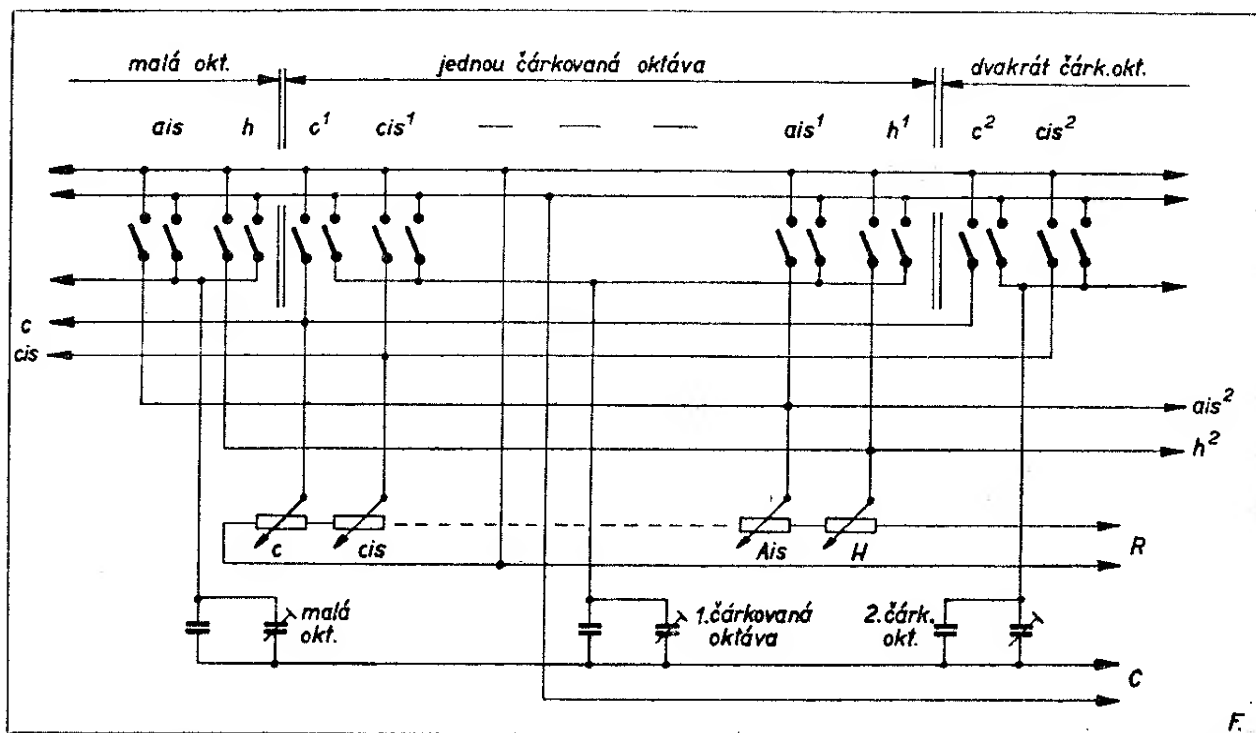


Obr. 24. Reaktanční elektronka.

čím větší je $1/\omega C$ proti R (jalový odpor proti účinnému). Ztráty R_1 jsou rovný převratné hodnotě strmosti, tedy $1/S$. Poněvadž v tomto zapojení závisí výsledná kapacita také na strmosti a tu je možno v poměrně širokých mezích měnit předpětím, umožňuje použití reaktanční elektronky také ladění tónů poměrně malými odpory, které určují předpětí. Zde je opět příležitost pro experimentální radioamatérskou práci.

Při volbě tónových kmitočtů a jejich doladování, ať je již provedeno podle způsobu na obr. 22a, b nebo podle obr. 23, je vždy třeba pro každou klávesu celého použitého tónového rozsahu nástroje zvláštního říditelného odporu nebo kondensátoru. Zařízení je však možno také zjednodušit a počet laděných

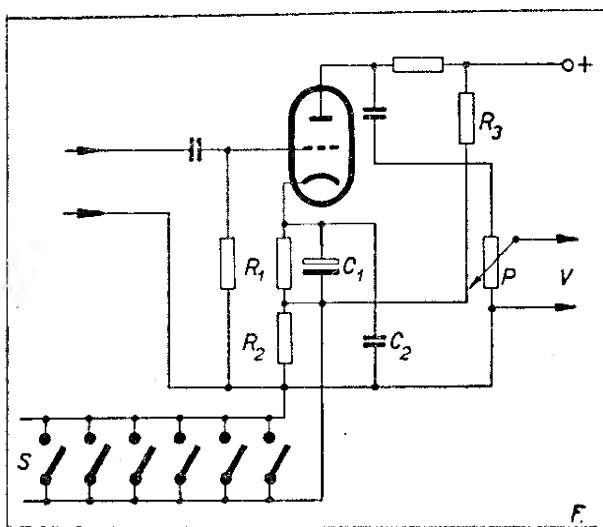
prvků snížit na 12 pro jakýkoliv tónový rozsah. Princip takového zapojení je na obr. 25. Zde je naznačeno zapojení pro rozsah tří oktáv, malé až $2 \times$ čárkované. Je použito dvanácti ladicích odporů, z nichž každý je připojen současně na všechny tři stejné tóny v různých oktávách, třeba první na c, c^1, c^2 , druhý na cis, cis^1, cis^2 a podobně. Pod každou klávesou jsou však dva spínače, jeden pro odpory a druhý pro kondensátory. Kondensátorové spínače jsou spojeny vždy v celé jedné oktávě paralelně a vyvedeny na příslušný oktávový kondensátor. Stiskneme-li ku příkladu tón ais , zapojí první spínač ladicí odpor AIS a druhý první ladicí kondensátor (s paralelním doladovacím), patřící malé oktávě. Stisknutím tónu h se zapojí ladicí odpor H a též kondensátor jako u ais . Stisknutím tónu c^1 se zapojí odpor pro tón C , ale již další ladicí kondensátor patřící jen jedné čárkované oktávě. Tento kondensátor tedy působí jen po tón h^1 . Při stisknutí klávesy c^2 se zapojí opět společný ladicí odpor pro tón C , ale kondensátor jen pro dvakrát čárkovanou oktávu. Naladěním jednotlivých odporů u tohoto zapojení se tedy naladí současně tytéž tóny ve všech použitých oktávách.



Obr. 25. Oktávové řazení tónových kondensátorů.

Správné polohy jednotlivých oktáv se celkově naladí nastavením příslušných oktávových kondensátorů. Prakticky se postupuje tak, že se odpory naladí nejvyšší oktáva. Pak se stiskne některý tón následující nižší oktávy a doladí se příslušným oktávovým kondensátorem podle téhož tónu v oktávě předchozí. Tím je naladěna správně celá tato oktáva. A podobně se postupuje u dalších oktáv; oktávových kondensátorů musí být tolik, kolik je celkem oktáv.

Při zapínání tónů (klíčování) ať již u oscilátoru RC nebo LC , vznikají traskavé náběhové zvuky (kliky), které působí dosti rušivě. Proto se velmi často za oscilátorem používá zvláštního zesilovacího stupně, v němž se tyto náběhy odstraňují. Provádí se to tak, že elektronka tohoto stupně – viz obr. 26 – je v klidu zablokována vysokým záporným předpětím, vytvořeným spádem na odporu R_2 v katodě. Pod každou klávesou je mimo „hracího“ kontaktu (nebo dvou kontaktů podle systému na obr. 25) další kontakt S (obr. 26) seřízený tak, že při stisknutí klávesy se spojí nejprve hrací kontakt a teprve po něm zapojovací kontakt S . Při stisknutí klávesy se tedy předpětový odpor R_2 spojí na krátko a mřížka má jen předpětí, vznikající na odporu R_1 , blokováném kondensátorem C_1 . Tato změna však nenastává okamžitě, ale pozvolně, neboť původním vysokým předpětím byl nabit také kondensátor C_2 a elektronka se otevírá podle toho, jak na-

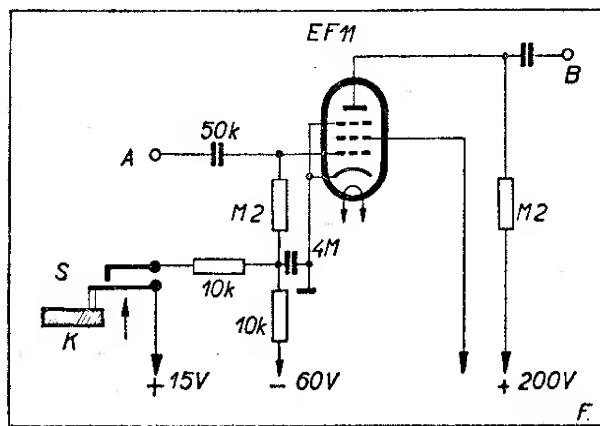


Obr. 26. Blokovací a oddělovací stupeň.

pětí na tomto kondensátoru klesá. Tím se odstraňují nejen „kliky“, ale okruh slouží zároveň jako oddělovací stupeň – ve většině případů totiž není možno zapojit regulátor hlasitosti P přímo na výstup elektronky oscilátoru, neboť by při nastavování zpětně působil na kmitočet. Rovněž kmitočtové filtry, o nichž bude zmínka dále, musí být připojeny až za tímto oddělovacím stupněm.

V popsaném obvodu je však možno vytvářet i různé nakmitávací případně i dokmitávací průběhy – viz kapitola II. – Tak na příklad obvod pro vytváření přechodových stavů podle obr. 27 [31] dává náběhy podobné dechovým nástrojům. Na mřížku exponenciální elektronky je v bodě A přiváděn kmitočet z oscilátoru. Elektronka je v klidu zablokována záporným mřížkovým předpětím 60 V. Stisknutím klávesy (spojením spínače S) dostane mřížka normální předpětí za dobu určenou časovou konstantou seriového odporu 10 k Ω a kondensátoru 4 μ F. Se stoupajícím předpětím narůstá anodový proud elektronky a její zesílení se zvětšuje až do maximální ustálené hodnoty. V tomto případě má vzniklý tón náběhový charakter lesního rohu.

Jiný obvod pro vytváření přechodových stavů podle obr. 28 [31] dává náběhy, vyskytující se u piana při uhození kladívka na strunu. Elektronka (selektoda) je opět zablokována velkým předpětím. Stisknutím klávesy K se zvedne úhelník U a přeloží kontakt S . Kondensátor 4 μ F se při tom vybije. Při dalším pohybu klávesy sklouzne úhelník U ná-

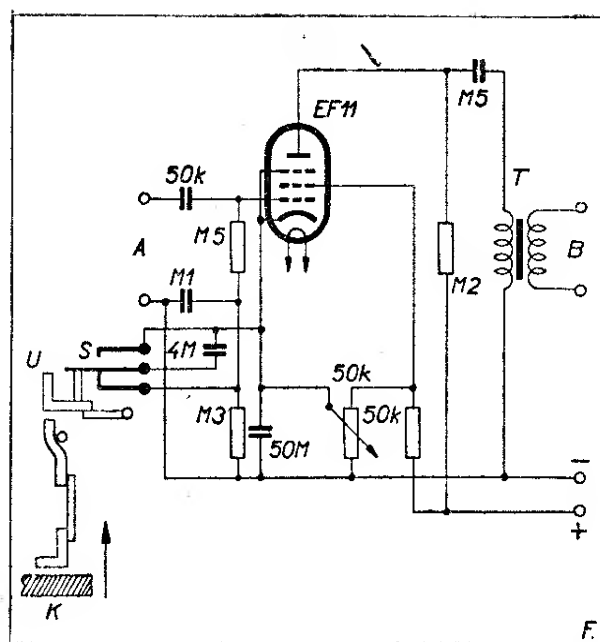


Obr. 27. Stupeň pro vytváření tónových náběhů.

hle zpět a kontakt *S* se vrátí do původní polohy. Vybitý kondensátor způsobí náhlou změnu předpětí elektronky, takže v prvním okamžiku maximálně zesílí. Zesílení se pak zmenšuje tou měrou, jak se kondensátor znovu nabíjí.

Složitějšími obvody pro vytváření přechodových stavů lze volit různé náběhy. Třeba u obvodu, kde část přiváděného kmitočtového pásma zakmitává rychleji a část pomaleji, vzniká náběh retné písňaly [31].

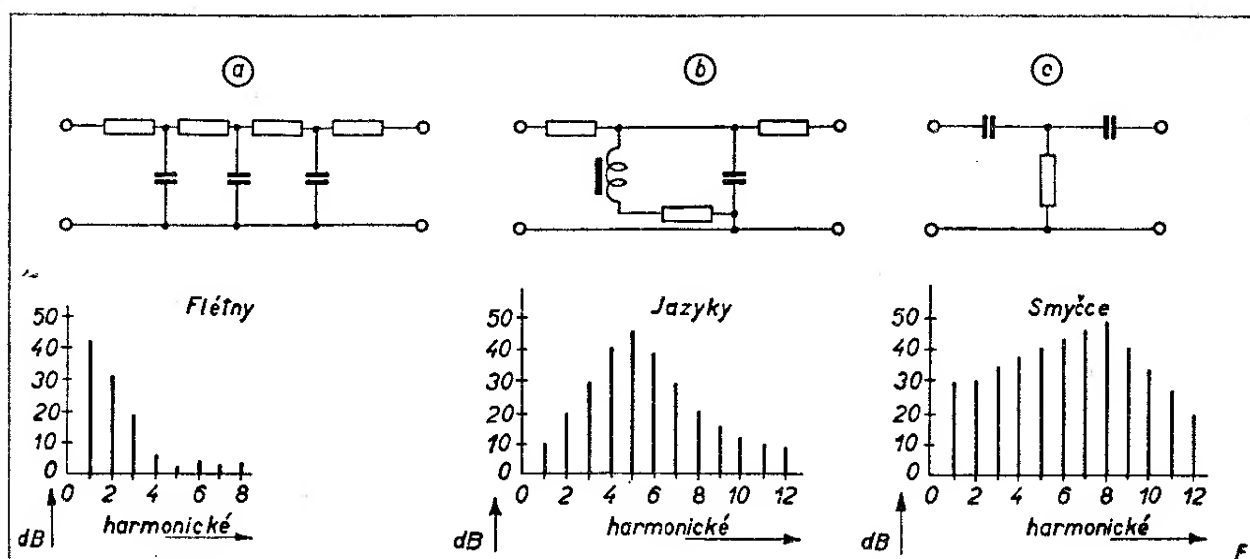
Za oddělovacím stupněm jsou mimo regulátoru hlasitosti, jak již bylo poznamenáno, také filtry k vytváření různých tónových průběhů – barevných rejstříků. Oscilátor vyrábí kmity s co možno velkým obsahem vyšších harmonických – ideální pilovitý průběh má všechny harmonické od 1. do nekonečna – a filtr musí propustit jen některé a všechny ostatní potlačit. Běžné obvody pro potlačení výšek nebo hloubek se sice i zde projevují změnou barvy tónu, ale ta není tak výrazná jak by bylo třeba. Pomocí rejstříkových filtrů se snažíme buďto napodobit osobitý charakter některých známých nástrojů, nebo vytvořit nový výrazný a libozvučný charakter. Při volbě napodobovacích filtrů vycházíme ze zvukového spektra vzorového nástroje, které určuje obsah a amplitudy harmonických. Spektrum se ovšem s výškou tónu mění – viz kapitolu II. obr. 3 – a i když propouštíme stálými hodnotami



Obr. 28. Stupeň pro vytváření tónových náběhů.

filtru různé tónové kmitočty, nebudou tyto změny nikdy souběžné a proto také nedosáhneme nikdy zcela přesného napodobení charakteru vzorového nástroje, ale jen přibližného.

Na obr. 29a je naznačeno spektrum tónu (asi střední polohy) u flétny. Filtr složený ze seriových odporů a paralelních kondensátorů propouští z pilovitého průběhu asi podobný sled vyšších harmonických jako na spektru. Na obr.



Obr. 29. Princip působení filtrů.

29b je charakteristické spektrum jazykových hlasů s vynikající čtvrtou, pátou a šestou harmonickou. Podobný průběh propouští zakreslený filtr, v němž paralelní indukčnost s kapacitou tvoří rezonanční okruh, zdůrazňující pásmo kolem páté harmonické. Na obr. 29c naznačený filtr, složený ze seriových kapacit a paralelního odporu, propouští pásmo odpovídající asi dole naznačenému spektru, charakteristickému u smyčcových nástrojů.

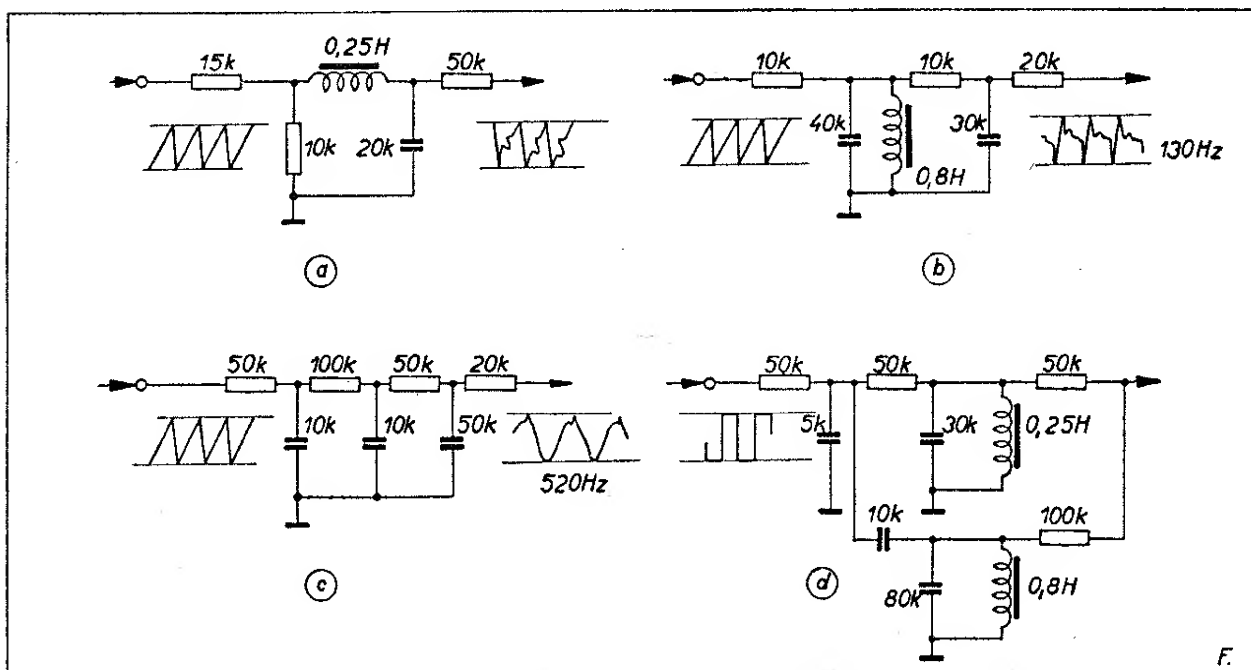
Příklady praktického řešení filtrů podle těchto zásad jsou uvedeny na obr. 30a, b, c, d [16]. Prvé tři filtry zpracovávají pilovité kmitočty, čtvrtý pak kmitočet pravoúhlý. Poslední rejstřík Vox Humana (s charakterem lidského hlasu) má dva LC rezonanční okruhy, které odpovídají příslušným dvěma formantovým oblastem na diagramu obr. 4.

Nezbytným doplňkem elektronického hudebního nástroje je tremolový nebo vibratový generátor. Nejčastěji se používá jako oscilátor pro nízké tremolové kmitočty Wien-Robinsonova můstku – viz principiální schema na obr. 31. Kmitočet je dán vztahem [32]:

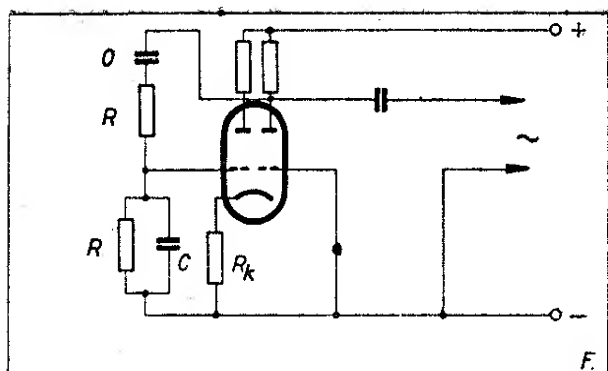
$$f = \frac{10^{13}}{2 \pi RC} [\text{Hz}; \Omega, \text{pF}].$$

Dobře se také uplatňuje nf oscilátor s RC okruhem pro posouvání fáze, který bude ještě dále podrobněji popsán. U některých nástrojů jsou tremolové kmitočty buzeny doutnavkovým relaxačním generátorem. Zde je ovšem třeba, aby kmitočet byl veden přes velmi bohatý filtrační řetěz, aby se odřízlo co nejvíce vyšších harmonických a zůstal pokud možno průběh blízký se sinusovce. Jinak se zbývající harmonické kříží s tónovými kmitočty a v rozsahu nástroje pak vznikají nepravidelnosti. Relaxační doutnavkový generátor je možno také upravit tak, že již sám vyrábí kmitočty, které nejsou pilovité, ale blíží se sinusovému. Odpor R_1 na obr. 32 je volen tak velký, aby vybíjecí doba kondensátoru C byla stejně dlouhá jako nabíjecí [33].

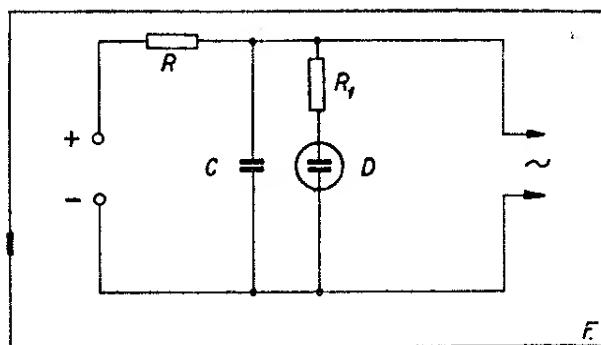
Kmitočet z tremolového generátoru je obvykle přiváděn přímo do tónového oscilátoru a to buď na katodový odpor nebo na pracovní mřížku. U RC oscilátorů, jejichž kmitočet je závislý na zisku elektronky (multivibrátory), se tedy tremolovými kmitočty mění předpětí a tím i strmost elektronky a tyto změny zisku způsobují i změny tónového kmitočtu. Nenastává zde tedy amplitudová modulace – tremolo – ale modulace kmitočtová a výsledným efektem je tedy *vibrato*.



Obr. 30. Příklady rejstříkových filtrů.



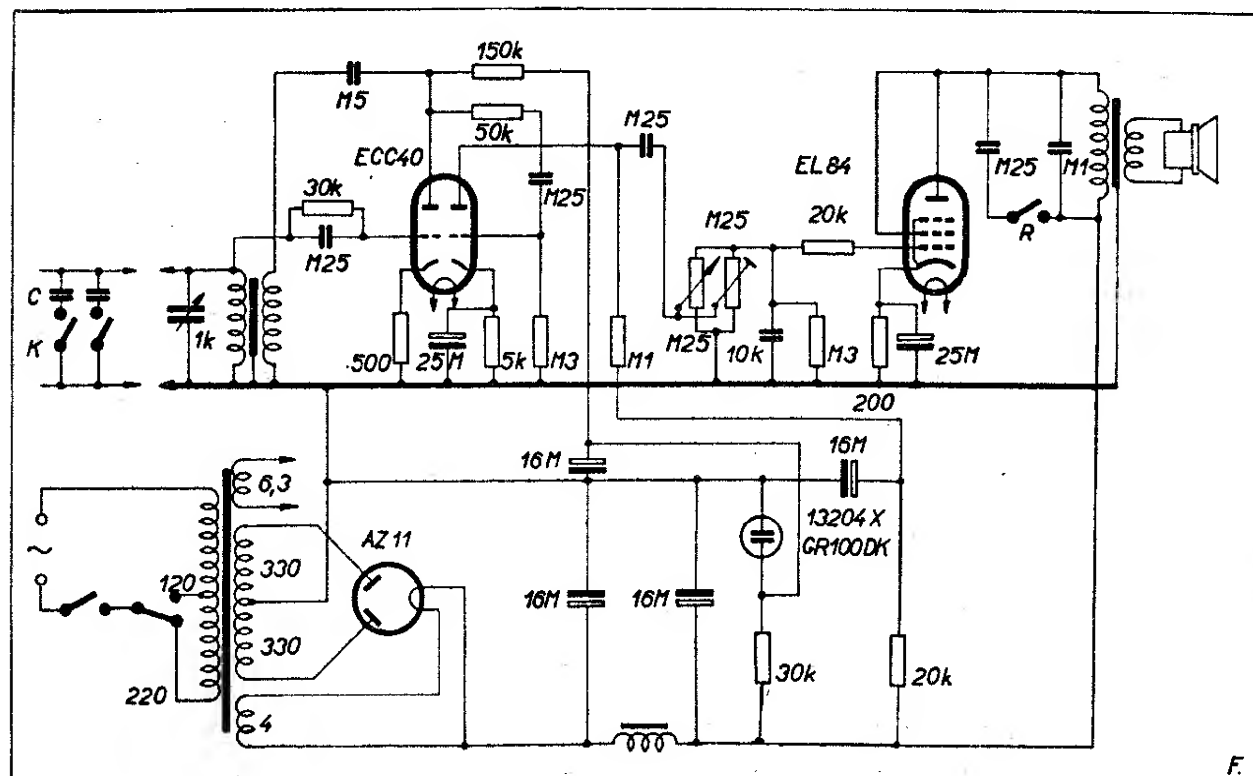
Obr. 31. Oscilátor s můstkem Wien-Robinson.



Obr. 32. Doutnavkový oscilátor s kmitů zhruba sinusovými.

Je-li v tónovém oscilátoru použito he-xody, je možno tremolovací kmitů přivádět také na třetí mřížku. Kdyby bylo třeba dosáhnout opravdu tremola, musel by se příslušný kmitočet přivádět až na oddělovací nebo některý další zesilovací stupeň. Prakticky se však nejvíce používá generátoru, zapojeného do tónového oscilátoru, poněvadž je zde amplituda stálá (regulace hlasitosti je až za oddělovacím stupněm) a také proto, že vibrato je hudebně podmanivější než tremolo. Podle probraných zásad jsou řešeny

továrně vyráběné monofonní hudební nástroje. Jednoduchého LC oscilátoru používá Hohner-Basso. Je to tahací harmonika, na jejíž klaviatuře melodické části se hraje v orchestru jen doprovod (místo normální basy). Doprovodní část – basové knoflíčky – harmonika nemá. Klávesnice nástroje má tónový rozsah 1C – a (34 kláves) s normálními, měchem rozezvučitelnými jazýčkovými hlasy. Pod každou klávesou je však ještě spínač, zapojující příslušný ladící kondensátor tónového LC generátoru – viz

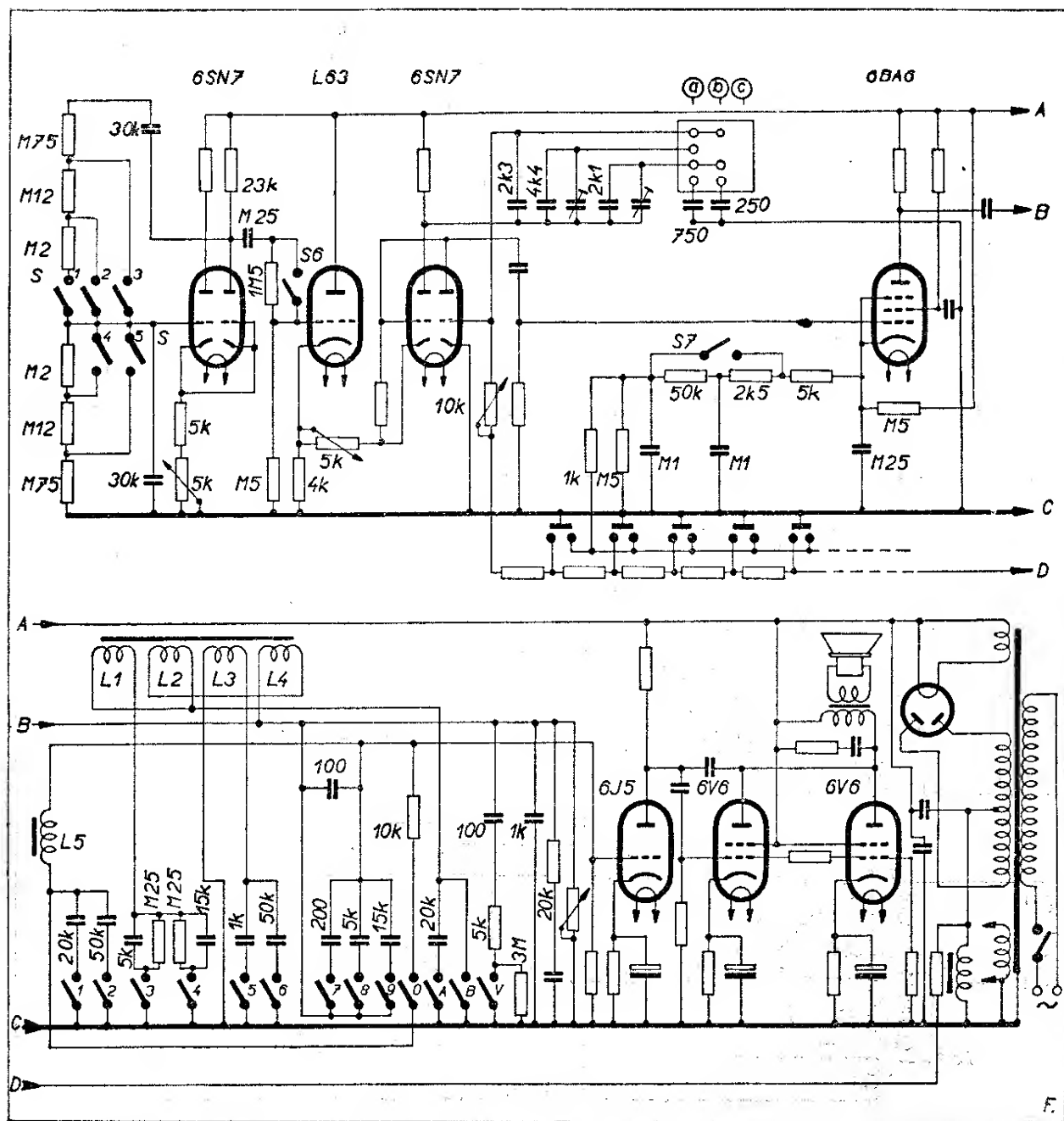


Obr. 33. Elektronický hudební nástroj (Basso, Hohner NSR).

schema zařízení na obr. 33. Hrajeme-li tedy na klaviatuře akord, ozývá se jeho nejvyšší tón mimo hlasů harmoniky také ještě z reproduktoru elektronického nástroje. Regulátory hlasitosti – viz schema $2 \times M25$ – jsou umístěny na dolní části harmoniky. Rejstřík je zde jen jeden a sice kondensátor M25 paralelně s primárem výstupního transformátoru. Jeho zapojením – spínač R – se dosáhne temného přednesu, rozpojený spínač dává jasný tón. Anodové napětí oscilátoru –

první systém ECC40 – je stabilisováno. Nástroj je spojen kablíkem a konektory se skřínkou, v níž je celé elektronické zařízení a speciální lehký basový reproduktor, jehož membrána má u nejhlubších tónů rozkmit až 10 mm. Hudebně se tento nástroj v orchestru velmi dobře uplatňuje.

Podobným způsobem je řešena basová harmonika východoněmecké výroby – Weltmeister-Elektrona. Zde je použito jen samotného monofonního elektronic-



Obr. 34. Elektronický hudební nástroj (Clavioline, G. Martin, Paris).

kého nástroje (jazykové hlásky nejsou), který je celý včetně eliptického reproduktoru vestaven dovnitř nástroje, jehož měch není pohyblivý.

V 1. čísle ročníku 1955 (str. 8) Amatérského radia byla zmínka o *Elektroniu* firmy Hohner (Trossingen, NSR). Tento nástroj byl řešen rovněž ve tvaru tahací harmoniky s klávesnicí jen v melodické části. Oscilátor – tentokrát typu RC – je vestaven dovnitř nástroje, zesilovač s koncovým stupněm a reproduktorem je ve zvláštní skřínce. Rejstříkové filtry se zapojovaly přímo na nástroji (způsobem obvyklým u harmoniky); zajímavě byla řešena regulace hlasitosti. Měch zde byl pohyblivý – ač se neužívalo vzduchu – a uvnitř bylo pákové zařízení ovládající regulační potenciometr. Otevíráním harmoniky – roztahováním měchu – se přednes zesiloval, stlačováním měchu naopak hlasitosti ubývalo.

Rovněž na základě oscilátoru RC – katodově vázaného multivibrátoru – pracuje v cizině velmi rozšířený monofonní nástroj *Claviolina* (firma Miller – Constant Martin Paris-London a licenční výroby holandské a italské). U nás používá Clavioliny jako doplňku k píšťalovým varhanám prof. Otta Čermák v Karlových Varech. Schema tohoto nástroje je na obr. 34. Vlastní tónový kmitočet je vyráběn multivibrátorem – druhá elektronka 6SN7 – a určován zařazením klávesového odporu mezi mřížkou a zemí druhého systému. Druhým určovacím členem je skupina kondensátorů zapojených mezi anodou prvního systému a zemí. Klávesnice má rozsah tři oktávy, ladící kondensátory jsou však seřazeny tak, že zapojením kombináčního spínače do polohy „a“ se ladění všech oktáv o jednu oktávu snižuje, zapojením do „c“ se ladění celého rozsahu o oktávu zvyšuje. Poloha „b“ je normální – střední – tónový rozsah. Přepínač *a-b-c* tedy rozšiřuje původní tříoktávovou klaviaturu na celkový rozsah pěti oktáv. Toto přepínání je založeno na podobném principu, jaký byl uveden na obr. 25. Tremolový – zde vlastně vibrátový – kmitočet na Wien-Robinsonově můstku s první elektronkou 6SN7 je zesílen elektronkou L63 a vmodulován do katody prvního systému tónového oscilátoru



Obr. 35. Elektronický hudební nástroj v kombinaci s harmonikou (*Multimonika Hohner, NSR*).

třetí elektronky 6SN7. Počet kmitů vibrata se dá měnit přepínáním spínačů S1-5. Čtvrtá elektronka 6BA6 je zapojena jako blokovací oddělovací stupeň, jehož náběhy lze měnit spínačem S7 a „kliky“ se blokují druhým kontaktem pod klávesou. Za oddělovacím stupněm je skupina odporů, kondensátorů a tlumivek, zapojovaných spínači 1-9 a O, A, B, V. Kombinací těchto spínačů se dosahuje velmi rozmanitých zvukových barev, které jsou velmi kontrastní a účinné. Koncový stupeň s 6J5 a dvěma paralelně zapojenými 6V6 je již běžný. Zařízení se skládá z malé klaviatury s třemi oktávami krátkých kláves a tlačítka k ovládání rejstříků, v jejíž skřínce jsou oscilační okruhy a filtry, a ze skříně s koncovým a napájecím stupněm a reproduktorem.

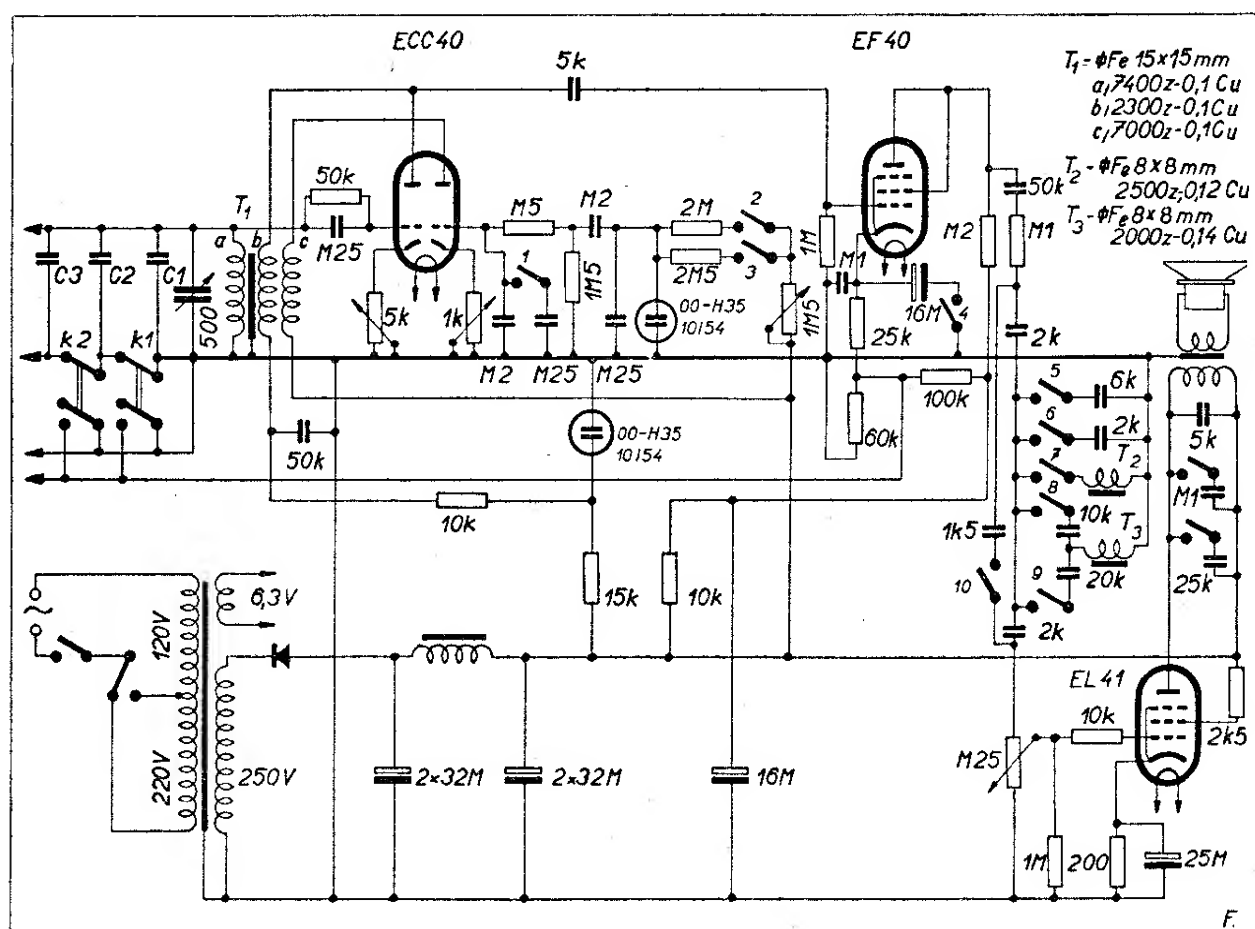
Claviolině podobný nástroj vyrábí také již zmíněná firma Hohner pod označením *Elektronium-Pi*, nebo firma Lipp, Stuttgart pod názvem *Artista* a ještě další výrobci.

Těchto nástrojů se používá buď samostatně v orchestru nebo, a to nejčastěji,

jako doplňku k pianu nebo varhanám.

Zajímavou kombinací elektronického nástroje se vzdušným jazýčkovým nástrojem, zvukem podobným harmonice, vyrábí firma Hohner pod názvem *Multimonika* – viz obr. 35. Dolní klaviatura v tónovém rozsahu $c-e^3$ otevírá klapky jazýčkových hlasů rozechvívaných malým elektrickým ventilátorkem (vestavěným přímo v nástroji). Hlasitost se řídí přivíráním přístupu vzduchu, ovládaným levým kolenáčem. Horní klávesnice v rozsahu $C-e^2$ ovládá kontakty elektronického nástroje zapojeného podle schematu na obr. 36. Oscilátor je zpětnovazební typu *LC* – prvý systém elektronky ECC40. Výška tónu je určována klávesovými spínači $k1, k2$ atd. zapojenými na ladící kondensátory podle systému uvedeného na obr. 23. Tremolo vyrábí doutnavkový relaxační generátor, jehož kmity po průchodu filtračním řetězem přicházejí na mřížku druhého systému ECC40 a po zesílení procházejí

z anody přes zvláštní vinutí *c* transformátoru *T1*. Kmitočet tremola se řídí ve dvou stupních spínači 2 a 3. Ze sekundáru transformátoru *T1* (*b*) je veden jak tónový tak tremolový kmitočet na blokovací a oddělovací elektronku EF40 (zapojenou jako trioda), v jejíž katodě se odstraňují „kliky“ pomocnými spínači pod klávesami. Za oddělovací elektronikou je skupina kondensátorů a tlumivek, které se kombinují rejstříkovými spínači 5–10. Signál se dále vede přes regulátor hlasitosti M25 na koncovou elektronku EL41, napájející eliptický reproduktor, vestavěný přímo v nástroji (pod kulatým horním krytem). V primáru výstupního transformátoru se zapojují další dva kondensátory, působící jako rejstříky. Rejstříky tohoto elektronického nástroje jsou sice efektní, ale ne tak výrazné jako u systémů s *RC* oscilátorem (s výchozím pilovitým kmitočtem). Hra na tento nástroj, kterých je u nás již několik, je velmi zajímavá a efektní, melodie se hraje



Obr. 36. Schema elektronické části Multimoniky.

v různých barvách elektronicky a doprovod pak na dolní klaviatuře, která má také 7 různých rejstříků.

Monofonní elektronické nástroje, jejichž ukázky zde byly popsány, jsou jen vývojovým pokračováním původního Trautonia, jak již bylo podotknuto. S tohoto hlediska je také třeba se dívat na jejich jednohlasou hru. Často bývá vytýkáno, že na klávesnici není možno hrát v akordech (je možno, ale ozve se vždy jen nejvyšší tón). U těchto nástrojů, jejichž charaktery jsou blízké nástrojům strunným a dechovým, bylo klávesnice použito jen pro usnadnění techniky hry, která byla na původním drátovém manuálu velmi obtížná. Nástroje napodobují nebo rozšiřují možnosti nástrojů dechových nebo strunných, u nichž je hra rovněž monofonní a nikdo nepožaduje na příklad na houslích hru v akordech. A konečně ještě jedno kritérium. Hlavním důvodem hry v akordech je dosažení barvitosti melodie. S tohoto hlediska se požadavku dosáhne i u monofonní hry mnohem snáze širokými možnostmi rejstříkové volby různých charakterů. Konečně je také třeba vzít v úvahu, že elektronické monofonní nástroje jsou proti klasickým poměrně velmi levné – vyspělá výroba slaboproudé elektrotechniky – a nelze proto od nich požadovat zázraky.

Z uvedených důvodů se také elektrofonické monofonní nástroje stále více a více uplatňují a zájem o ně – zvláště v moderní hudbě – roste.

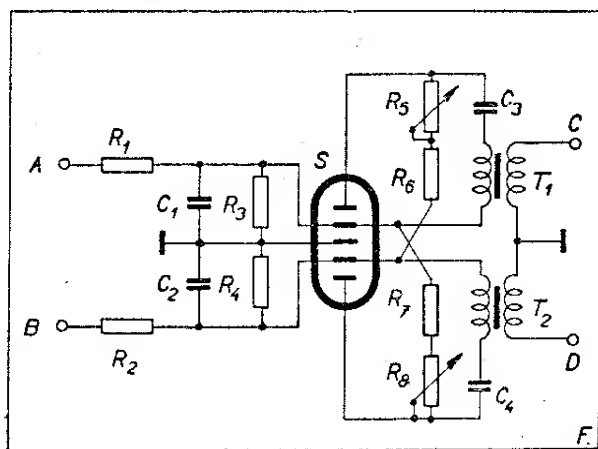
Všechny principy používané u jednooscilátorových elektronických nástrojů je možno aplikovat u poměrně velmi složitých nástrojů polyfonních, stavěných většinou v typu *elektronických varhan*.

Prvé pokusy s mnohaoscilátorovými nástroji, které měly napodobit varhany, byly stejně jako u nástrojů monofonních konány s doutnavkami, na příklad Bodeho elektroakustické varhany [34], nebo Vierlingovy elektrické varhany, kde bylo použito speciálních pětielektrodo- vých výbojek (viz obr. 37). Krajní elektrody jsou zapojeny jako doutnavkové generátory, jejichž kmitočet určují RC okruhy R_5, R_6, C_3 a R_7, R_8, C_4 . Střední elektrody výbojky S stabilisují napětí ze zdroje AB pro oba oscilátory. Jedna vý-

bojka tedy dává 2 tónové kmitočty, celkem bylo v nástroji použito 48 těchto doutnavek pro rozsah 96 tónů od 2°C do h^4 . Přes speciální doutnavky a stabilisaci každého oscilátoru nebyla stálost kmitočtu dostatečná [35] [19] a po ještě dalších pokusech se definitivně od používání výbojek pro polyfonní tónové oscilátory upustilo.

Varhany s elektronickými oscilátory se nyní konstruují zásadně ve dvou typech, a sice buď s nezávislými samostatnými generátory každého jednotlivého tónu celého rozsahu, nebo jen s dvanácti samostatnými oscilátory jedné temperované oktávy, z níž se pak oktávové kmitočty jednotlivých tónů v dalších oktávách odvozují pomocí děličů nebo násobičů.

Prvý způsob se samostatnými oscilátory je technicky nejnáročnější a také nejsložitější, poněvadž stabilita jednotlivých samostatných oscilátorů musí být neobvykle vysoká – rozladění mezi kterýmikoliv dvěma tóny celého rozsahu nesmí být v žádném případě větší než maximálně 0,2 % kmitočtu. Takové elektronické varhany staví na příklad firmy C. G. Conn Ltd, Elkhart, Indiana (USA) pod značkou *Connsonata*. Nástroj má celkem 178 samostatných LC generátorů (89 dvojitých triod 12AH7-GT) a výrobce zaručuje přesnost kmitočtu 0,1 %. Toto jinak velmi komplikované řešení má výhodu v tom, že je možno na něm dosáhnout věrný, tak zvaný „Chorus-effekt“, který je u klasických



Obr. 37. Stabilisovaný výbojkový generátor (Vierling).

varhan tak charakteristický. Tento efekt vzniká při hře téhož tónu současně na dvou manuálech tím, že kmitočty obou stejných tónů nejsou úplně přesně stejné a interferencí nastává jemné rozechvění tohoto souzvuku. U elektrofonických varhan nebo elektronických systémů, používajících pro týž tón na různých manuálech jediného generátoru (děličové a násobivé principy) přirozeně tento efekt nelze dosáhnout a jeho napodobení umělým vmodulovaným rozechvíváním zní příliš uměle [36].

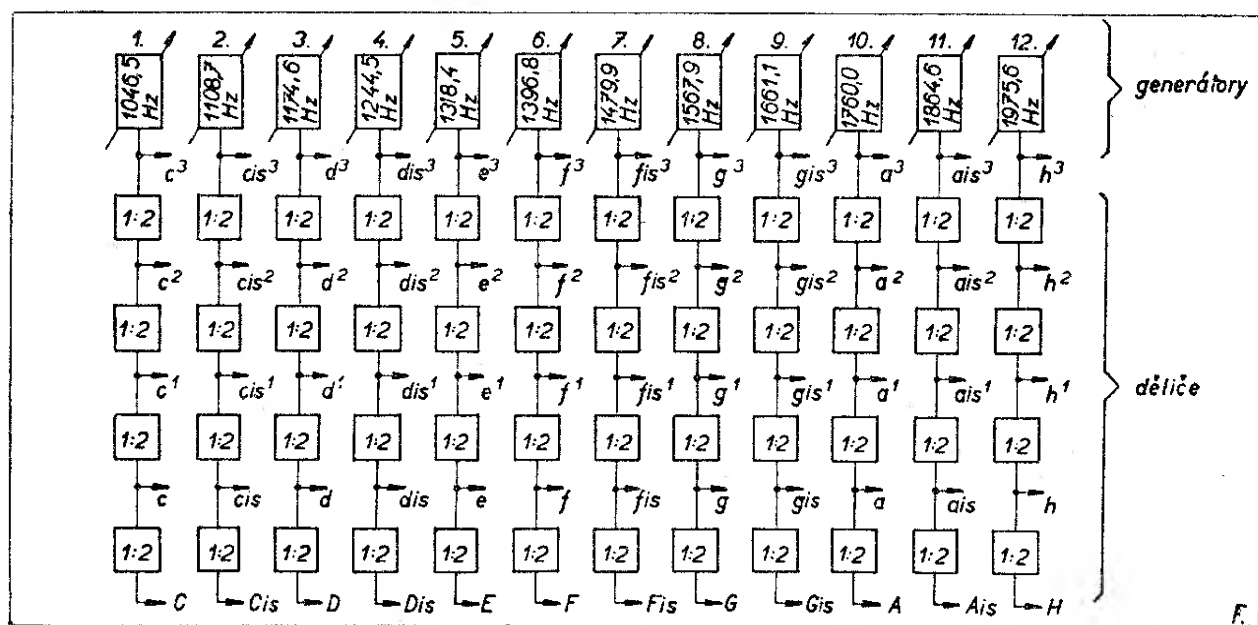
Nejvíce typů elektronických varhan je založeno na jednodušším a mnohem snáze laditelném principu dělení nebo násobení kmitočtů. Tento systém je schematicky naznačen na obr. 38. Dvanáct samostatných (nejčastěji *LC*) generátorů vyrábí kmitočty nejvyšší použité oktávy tónů – na obr. 38 tříkrát čárkované. Tóny této oktávy jsou vyvedeny z generátorů na klávesové spínače. Současně jsou ale vedeny na prvou řadu děličů 1:2, za nimiž vychází celá dvakrát čárkovaná oktáva $c^2 - h^2$, za třetí řadou děličů jednocárkovaná atd. Kolik řad děličů je k dispozici, tolik následujících nižších oktáv lze z oscilátorů odvodit. Někdy bývá tento princip použit také tak, že generátory pracují na nejnižší oktávě a všechny vyšší jsou odvozovány pomocí řad násobičů. První způsob – dě-

lení – je však vhodnější proto, že je možno snáze dosáhnout vyšší přesnosti na vyšších kmitočtech a eventuální chyby se pak ještě dělením zmenšují. U násobivého systému se chyby vzniklé v generátorech o nízkém kmitočtu naopak i ještě znásobují.

Jednotlivé tóny se zapojují klávesovými spínači. K dosažení různých zvukových barev se zde používá opět harmonické synthesy, založené na stejném principu jako na obr. 14, jen s tím rozdílem, že místo elektromagnetických rotačních generátorů jsou zde generátory elektronické. Mimo této harmonické synthesy je u některých značek použito ještě také filtrů a i obvodů pro umělé vytváření přechodových stavů, aby bylo dosaženo co možno všech podmínek pro správné vytváření tónových barev obvyklých v hudbě.

Příklad zapojení tónového *LC* oscilátoru s následujícími pěti dělicími stupni, jak je ho použito u elektronických varhan značky *Baldwin* (USA) [37] je na obr. 39. Všech 12 takových jednotek je spojeno na jedné kostře, na níž je i vibraťový oscilátor (připojený na mřížku každého z oscilátorů – viz obr. 39) a napájecí stupeň.

Na podobném principu jsou založeny i jiné značky elektronických varhan, na příklad *Allen* (USA), *Bode* (NSR), *Hay-*



Obr. 38. Odvození všech tónů z 12 základních generátorů.

gren (USA), Jennings (GB), Minshall-I (USA), AWB (NSR).

Elektronické varhany jsou zajímavé také po stránce hospodářské. Nástroj o stejném rozsahu jako velké píšťalové varhany stojí jen o něco více než normální koncertní křídlo (klavír) a není tedy vůbec srovnatelný s mnoho a mnohonásobně větší cenou varhan klasických. Na první pohled se zdá, že množství elektroněk a přesných okruhů musí být mnohem nákladnější než poměrně jednoduché dřevěné nebo kovové píšťaly, ale skutečnost je jiná. Elektrické součástky jsou dnes vyráběny ve velmi dokonalé a automatisované výrobě ve velkých seriích a tudíž velmi levně, zatímco speciální výroba hudebních nástrojů je dosud technicky velmi málo vyvinuta – většinou nejvýše maloseriová a ruční. Uvedený technický pokrok také umožnil, že elektronické varhany již přestaly být „královským nástrojem“ – pokud se ovšem týče pořizovací ceny – a velmi se uplatňují nejen v moderní hudbě, různých orchestrech a skupinách, ale i jako nástroj pro domácí hudbu. Hodí se k tomu také proto, že dynamické možnosti jsou tak široké, že elek-

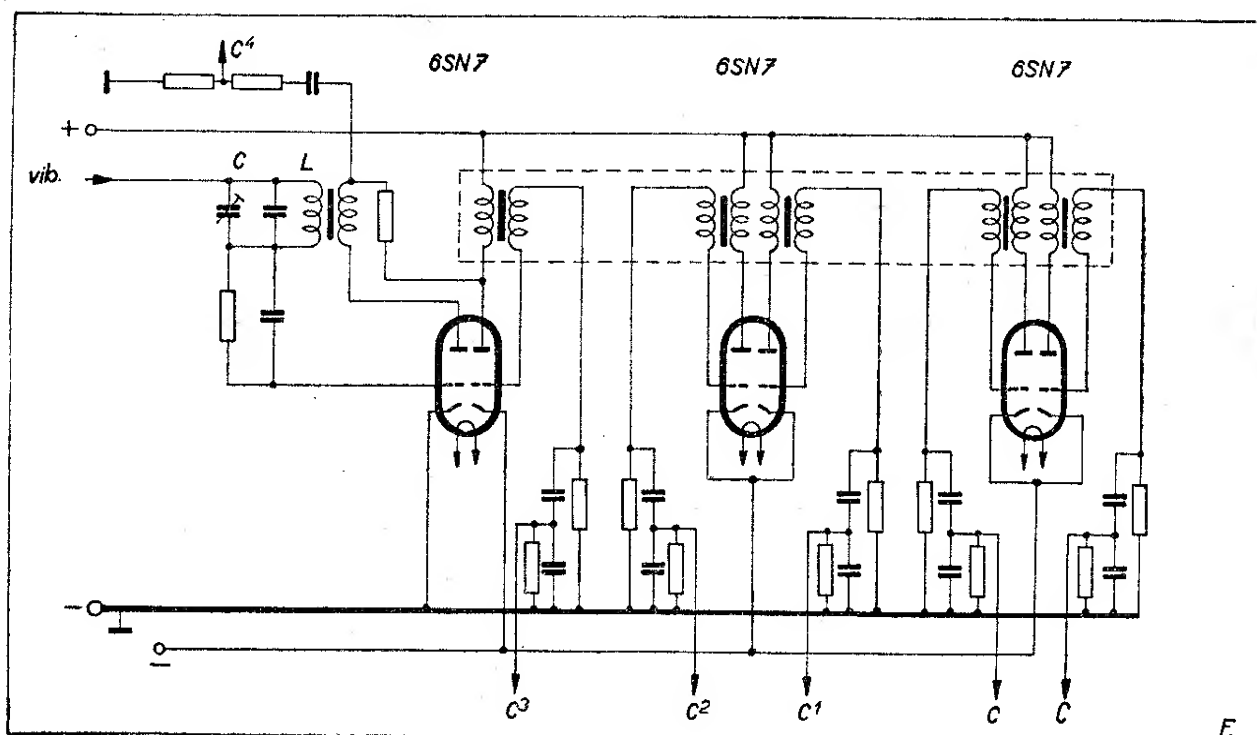
tronických varhan je možno použít při velmi tichém přednesu na domácím intimním koncertě stejně jako při koncertě pořádaném třeba pod širým nebem s nárokem na velmi mohutnou reprodukci. Proti klasickým varhanám mají nespornou výhodu také ve velmi snadné přenosnosti (staré varhany, jak známo, přenášet nelze vůbec) a nezávislosti ladění na teplotě prostředí.

To ovšem neznamená, že by rozšiřující se elektrické varhany měly znamenat konec nástrojů klasických. Jak již bylo dříve zdůrazněno, nemohou elektr. nástroje zcela a ve všem nahradit původní, stejně jako tyto nemají nové možnosti elektrických, které jsou tedy *novými nástroji pro nové hudební možnosti*.

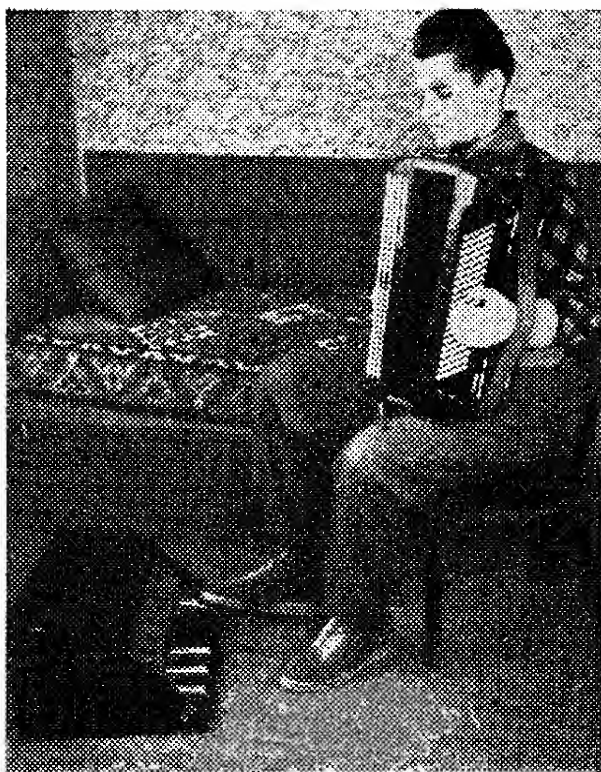
VI. Amatérské možnosti.

Jak již bylo poznamenáno v I. kapitole, otevírají se v novém oboru slaboproudé elektrotechniky – v elektrických hudebních nástrojích – také nové a velmi široké možnosti pro činnost radioamatérskou.

Výroba původních hudebních nástrojů měla nejbližší k umělecko-řemesl-



Obr. 39. Oscilátor a děliče jednoho tónu elektron. varhan (Baldwin, USA).



Obr. 40. Elektroakustická harmonika s adaptorem.

ným oborům dřevařským, kovotlačitelským, ozdobnickým atd. Nový směr má však – až na vnější a formální úpravy – nejblíže k radiotechnice, zejména v oboru nástrojů elektronických, na příklad řešení tónových generátorů nemá daleko k problémům řádkovacích obvodů v televizi. Rovněž koncový stupeň a zejména reproduktorové systémy, o nichž pro nedostatek místa nemohlo být pojednáno, jsou otázky zcela společné s reprodukční nf technikou elektroakustických zařízení rozhlasu, gramofonu, zvukového filmu a podobně.

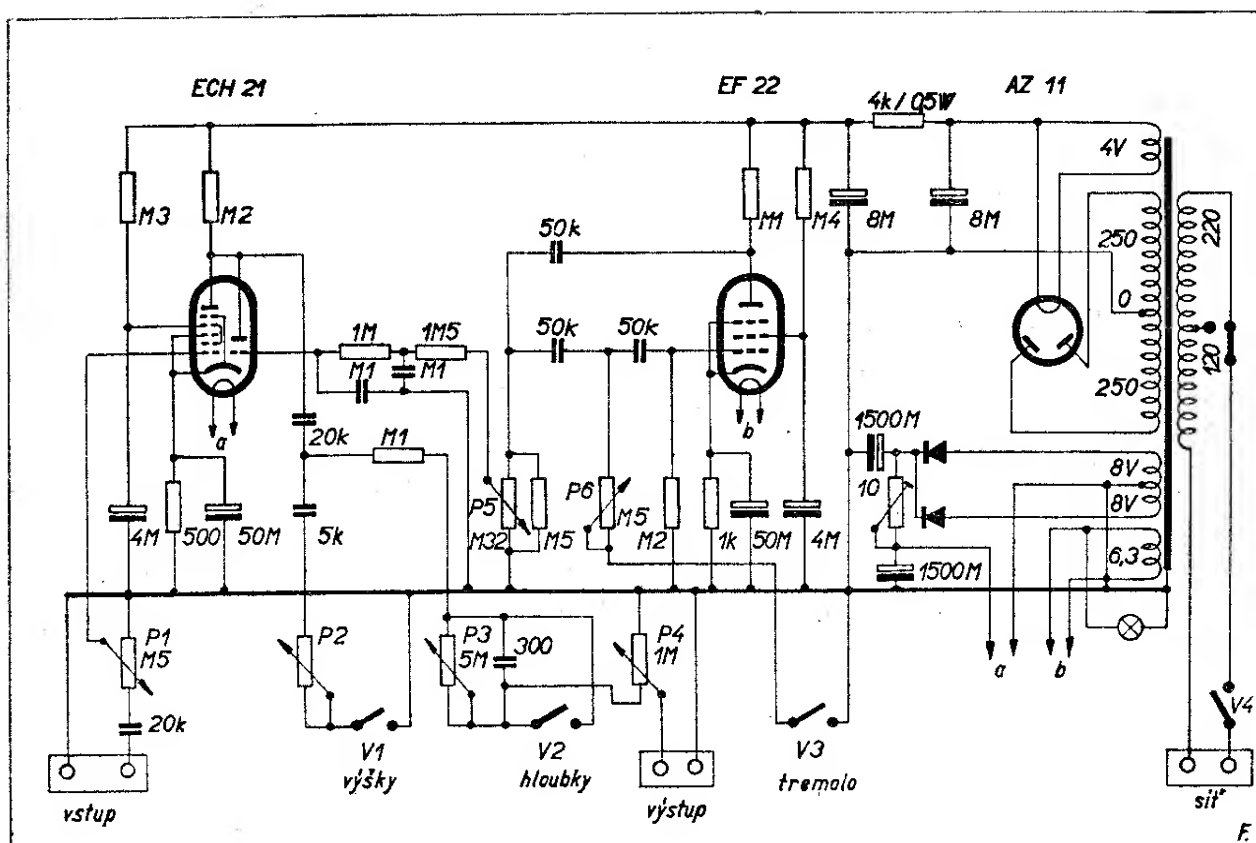
Otázka věrné reprodukce Hi-fi (High Fidelity) stává se dnes světovým, horečně řešeným problémem a je otázkou stejně tak gramofonové, magnetofonové a rozhlasové techniky jako dosud ne zcela uspokojivě řešenou otázkou elektrických hudebních nástrojů, které se odpoutaly od klasických resonančních desek a vzdušných sloupců a začaly být závislé na kvalitě reproduktorů.

Pro radioamatérskou činnost je zde tedy velmi široké pole studia, experimentů, konstrukce a tvoření se skutečně

praktickým cílem, neboť lze asi těžko nalézt opravdového radioamatéra, který by neměl kladný poměr k hudbě.

Elektroakustický systém hudebních nástrojů ukazuje popsany amatérský adaptor k elektroakustické tahací harmonice. Zařízení je patrně z obr. 40. Mikrofon je umístěn na kobylce v melodické části tahací harmoniky a vyveden na dole umístěný konektor. Je to výhodnější, poněvadž se melodická část při hře nepohybuje, kablík je tedy v klidu a vede k nožnímu pedálovému adaptoru, který je pak připojen na jakýkoliv vhodný zesilovač (třeba Tesla KZ 25) s vhodnými reproduktory.

Podrobné schema adaptoru je na obr. 41. Mikrofon v harmonice, respektive kablík od konektoru je připojen na vstup a potenciometrem *P1* se nařídí zkusmo střední požadovaná hladina přednesu podle prostoru, v němž se bude hrát. Signál je veden na hexodovou část ECH21, zapojenou jako nízkofrekvenční pentoda. Zesílený signál z anody je veden ke korekčnímu obvodu pro úpravu výšek (potenciometr *P2* a kondensátor 5000 pF), dále přes korekční obvod pro úpravu hloubek (potenciometr *P3* a kondensátor 300 pF) do výstupního regulátoru – potenciometr *P4* – za nímž je na výstupní svorky připojen kablík k vlastnímu zesilovači. Výstupní regulátor je řešen tak, že potenciometr *P4* je spojen ozubeným (případeť lankovým) převodem s pravým pedálem adaptoru – viz obr. 40. Sešlápnutím tohoto pedálu se jemně mění síla přednesu – hlasitost – od minima do maxima (maximum je naříděno jednak na vstupu adaptoru – *P1* – a jednak na vstupu vlastního zesilovače). Tento pedál tedy umožňuje tichou čistou hru a široké řízení dynamiky jen elektricky. Další dva pedály (zprava) jsou spojeny s tlačítky *V1* a *V2*. Tlačítko *V1* – v normální poloze otevřené – je spojeno s regulátorem výšek *P2*. Tímto potenciometrem si předem nařídíme, o kolik asi budeme při určitých partiích skladby potlačovat výšky – získat temnější zabarvení zvuku – a při hře pak na patřičných místech pouhým stisknutím pedálu tohoto „rejstříku“ využijeme. Podobně je tomu i u korekce hloubek. Potenciometrem *P3* napřed nastá-



Obr. 41. Schema adaptoru k elektroakustické harmonice.

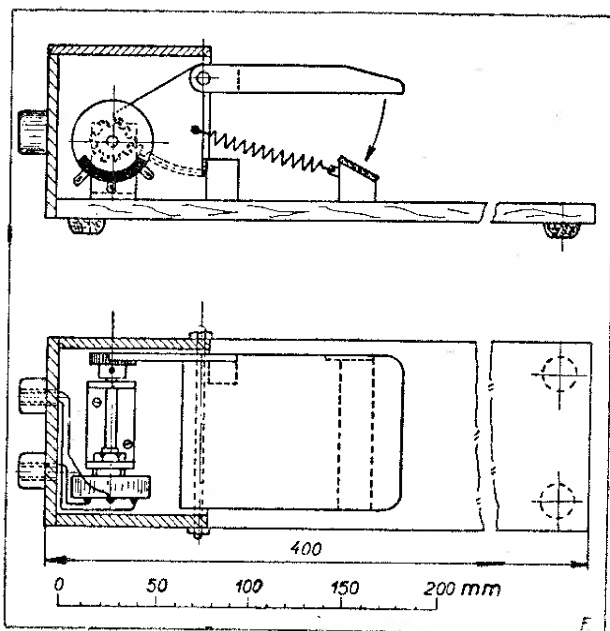
víme stupeň potlačení basů – ostřejší přednes – a zařazujeme jej pak podle potřeby mezi hrou stisknutím pedálu s tlačítkem V2. Ovšem tlačítko V2 je v normální poloze zavřeno, stisknutím pedálu se otevírá. Toto řešení je opět mnohem pohodlnější a pohodovější než pouhá regulace knoflíky na zesilovači.

Korekční obvody, zvláště P3 – V2 musí být pečlivě stíněny (zejména tlačítko V2), aby zařízení nebručelo.

Elektronka EF22 spolu s fázovacím okruhem P5–P6–0,2 MΩ a $3 \times 50\,000\text{ pF}$ tvoří nf tremolový generátor. Kmitočet tremola – střední hodnota asi 7 Hz – se řídí potenciometrem P6, jehož konec je připojen na střídavý vypínač V3 (poslední pedál vlevo na obr. 40), který jedním stisknutím zapne, druhým vypne. Při otevřeném vypínači V3 je narušen fázovací okruh a elektronka vypadne z oscilací, zavřením začne kmitat. Tremolové kmity se odvádějí z potenciometru P5 (má mít hodnotu 0,2 MΩ, byl proto složen s potenciometru 0,32 MΩ a paralelního odporu

500 kΩ). Kmitočet, jehož amplituda se řídí polohou běžce potenciometru P5, prochází filtračním řetězem 1,5 MΩ – 1 MΩ a $2 \times 0,1\text{ }\mu\text{F}$ na mřížku triody ECH21. Filtrační řetěz je nutný, aby se kmity zbavily vyšších harmonických, které při tremolování způsobují „tlučení“. Zesílený tremolový kmitočet se vmodulovává do signálu na spojených anodách hexody a triody elektronky ECH21. Knoflíky potenciometrů P5 a P6 jsou umístěny nad tremolovým pedálem a hudebník si opět před hrou – podle její charakteristiky – předem nařídí výšku tremolových kmitů (P6), jakož i hloubku tremolové modulační (P5) a pak v příslušných partiích skladby jen nohou tremolo zapíná a vypíná.

Poněvadž prvá elektronka ECH21 je vlastně ještě před vstupem zesilovače, je doporučitelné ji žhavit stejnosměrným proudem, který zde dodává vinutí síťového transformátoru $2 \times 8\text{ V}$ se selenovým usměrňovačem (dvoucestným) a filtrem 10 Ω a $2 \times 1500\text{ }\mu\text{F}$. Odpor 10 Ω je ovšem nutno přesně nastavit tak, aby



Obr. 42. Nožní regulátor hlasitosti.

na vlákně elektronky ECH21 bylo skutečně 6,3 V.

Při stavbě tohoto adaptoru bylo použito výprodejního předzesilovače Opefon, kde je k dispozici síťový transformátor s usměrňovači a filtračním řetězem (napětí zde bylo využito pro žhavení prosvětlovací žárovky zvukového filmu). Je zde také eliminátor (s elektronkou AZ1) s dvěma elektrolyty po 4 μF a zvláště pak pružně zavěšená objímka, kterou použijeme pro ECH21.

Generátor s posouváním fáze, kterého je zde použito, se pro účely tremola dobře hodí. Kmitočet generátoru je dán vztahem:

$$f = \frac{1}{2 \pi RC \sqrt{6}} \quad [\text{Hz}, \Omega, \text{F}).$$

Fázovací okruh má značný útlum; proto aby oscilace mohly nastat, musí být minimální zisk elektronky následující [38]:

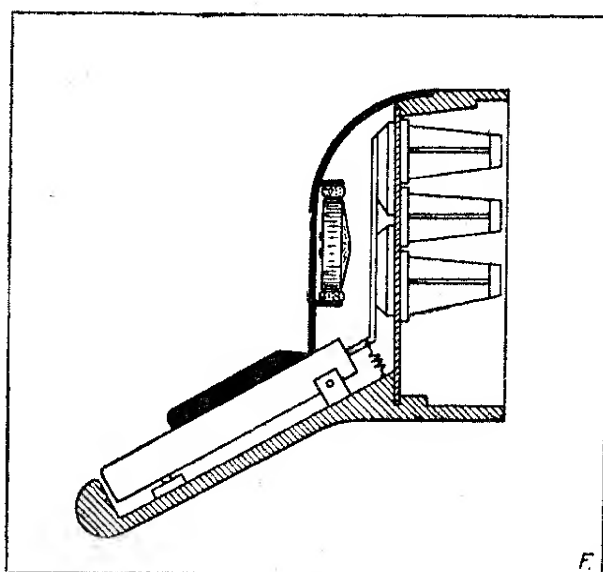
$$A = 29 + 23 \frac{Ra}{R} + 4 \left(\frac{Ra}{R} \right)^2$$

Za daných okolností vychází potřebný zisk asi 40, je proto nutno použít pentody – s běžnou triodou se takového zisku nedosáhne. Je ovšem možno použít také nestejných členů R a C a pak potřebný zisk vychází menší [39].

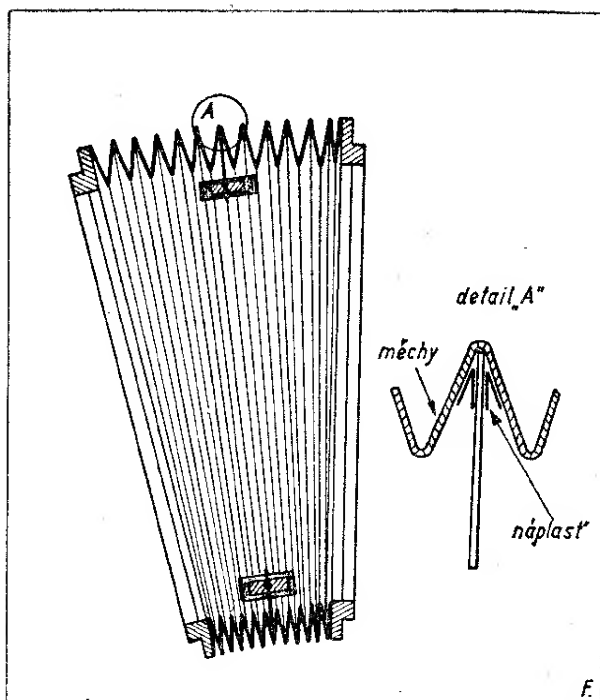
V popsané elektroakustické harmonice bylo použito běžné krystalové mikrofonní vložky, zavěšené pružně na gumičkách. Bezmembránové krystalové dvojce bylo málo citlivé, zmíněná vložka bez úpravy zase příliš – reagovala i na mluvu hudebníka. Byla proto položena na membránu asi 5 mm silná vrstva vaty (nezmáčknuté), která byla upevněna gumičkou v drážce na obvodu vložky. Touto úpravou se citlivost snížila tak, že ještě dobře reaguje na všechny tóny nástroje a již jen velmi málo na zvuky vnější.

Amatérská úprava elektroakustické harmoniky může být přirozeně i jednodušší. Místo adaptoru postačí na příklad jen nožní regulátor dynamiky, jehož konstrukce je naznačena na obr. 42. Kabelík z mikrofону v nástroji jde přes potenciometr tohoto regulátoru přímo na vstup zesilovače. Regulátorem ovládáme dynamiku a chvěním nohy můžeme napodobit i tremolo. Umístění mikrofону může být řešeno také různým způsobem. Na obr. 43 je mikrofonní vložka zavěšena na vnitřní straně příklopky melodické části. Zde již velmi špatně „slyší“ tóny doprovodu, reprodukuje tedy jen melodii, což v orchestru, kde harmonika hraje bez basů, stačí.

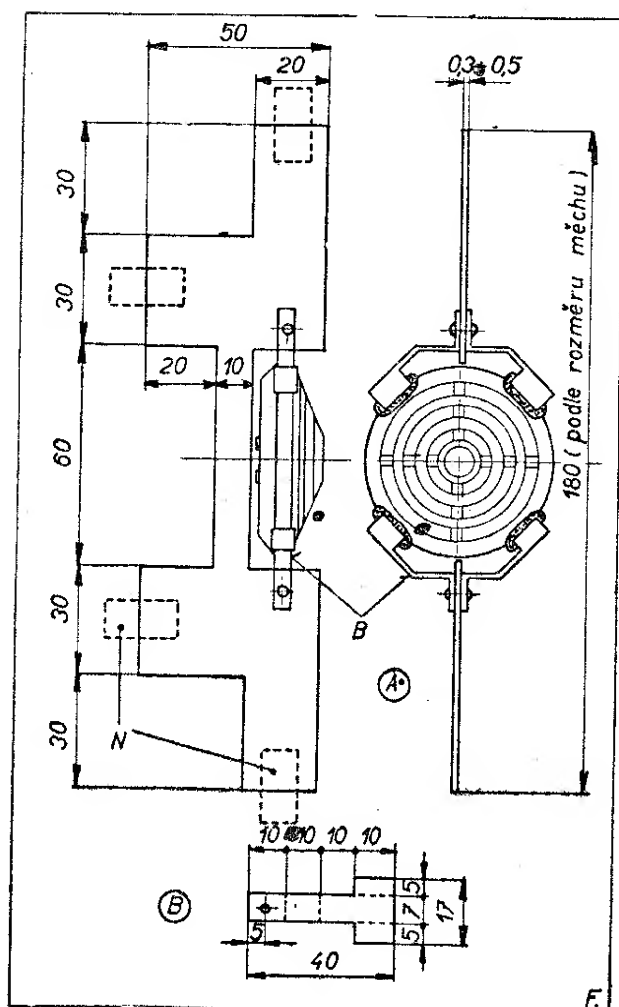
Také je možno zavěsit dva mikrofóny přímo mezi záhyby v měchu, jak ukazuje obr. 44 – detail držáků viz obr. 45. Zde snímají jak melodii, tak doprovod.



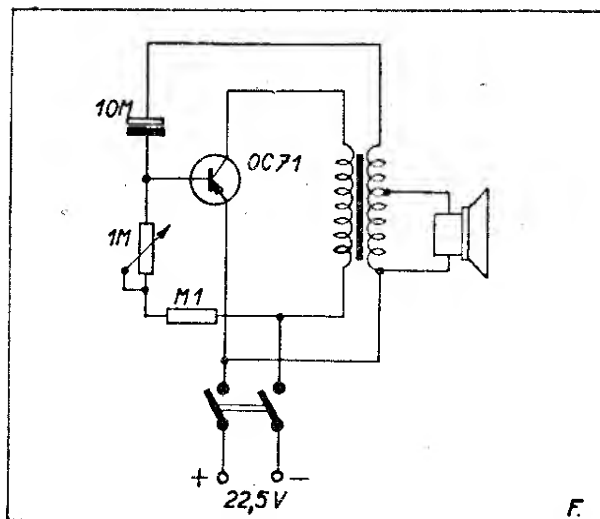
Obr. 43. Umístění mikrofónu v harmonice.



Obr. 44. Závěšení mikrofonů v měchu.



Obr. 45. Závěsný držák.



Obr. 46. Transistorový metronom.

Elektrofonické principy jsou celkem jednoduché, zejména elektromagnetické snímače strunných nástrojů se stavějí velmi často amatérsky – viz na příklad návody na kytarové snímače [40] nebo elektrofonické housle [41]. I zde však je možno řešit různé opravné (rejstříkové) a efektové (tremolo) obvody. Pokusy s dotekovými snímači se dají amatérsky provádět z krystalových gramopřenosků výměnou třmínku pro jehlu za malé olověné závažíčko sevřené na krystalu. Systémy s rotačními generátory jsou po stránce jemné mechaniky příliš náročné, než aby mohly být řešeny s úspěchem ve většině amatérských dílen.

Největší možnosti jsou proto u nástrojů elektronických, proto byly také v V. kapitole nejpodrobněji probrány. Zvláště u nástrojů monofonních (s jedním oscilátorem) lze provádět spoustu pokusů, studií a řešit i nové obvody – viz na příklad použití transistorů a germaniových diod, jak ukázkově představují obr. 46 a 47. Na prvním [42] je transistorem obsazený metronom s LC oscilátorem, řešený zajímavým způsobem. Od metronomu s pomalými kmity lze jistě dobře přejít ke generátorům s vyššími kmitočty. Na druhém obrázku je tak zvaný „Krytodyn“, nízkofrekvenční oscilátor, založený na záporném odporu germaniové diody [43]. Je-li dioda zapojena obráceně – na minus pól jde kladné napětí – pak v okamžiku, kdy napá-

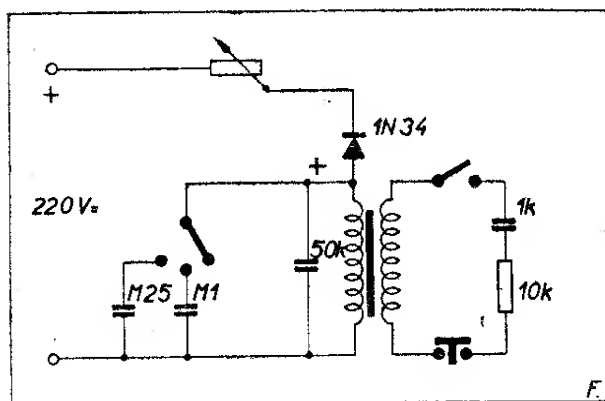
ječí napětí přestoupí hodnotu závěrného napětí, se LC okruh rozkmitá. Při experimentech však pozor, každá dioda nemusí kmitat! Samotnému autoru kmitalo ze 14 diod 1N34 jen 10.

Při řešení oscilátorů budeme vycházet, alespoň informativně, z dříve uvedených vzorců. Hodnoty součástek a zejména jejich tolerance však nedovolí jen tímto způsobem získat dostatečně přesné tónové kmitočty, které je třeba na požadovanou výšku doladit. Zvláště u monofonních nástrojů, kde hraje současně jen jediný tón, nelze při ladění užít známé praxe ladičů hudebních nástrojů – ladění a srovnávání temperované stupnice podle kvintových a kvartových dvojzvuků. Srovnávat výšky jednotlivých tónů třeba podle pianu je sice také možné, ale velmi zdlouhavé a bez praxe a cvičeného sluchu málo přesné. Pro amatérské ladění nám proto velmi dobře poslouží stejná metoda, kterou kontrolujeme správné obrátky gramomotoru, tedy stroboskopický kotouč se značkami pro všech 12 půltónů temperované stupnice. Kotouč je na str. II. obálky. Značky, jejichž počet pro jednotlivé tóny je uveden na štítku (etiketě), sice nelze určit naprosto přesně, poněvadž poměr dvou sousedících půltónů temperovaného ladění je iracionální, avšak použitý počet značek má největší chybu 0,18 % kmitočtu, tedy menší než přípustných 0,2 %. Tento kotouč o průměru normální gramodesky nasadíme na gramofon a na osu navlečeme šablonu podle str. II. obálky, kterou přichytíme na špalíček vedle gramotalíře*). Dout-

navkou zapojenou na síťové napětí (pozor na předřadný odpor) osvětlíme otáčející se kotouč a podle zastavení 77 značek kolem štítku nastavíme obrátky gramomotoru na správnou hodnotu 78 obrátek za minutu. Na síťový kmitočet se můžeme spolehnout, je v elektrárnách velmi přesně udržován, zejména v hodinách, kdy není síť přetížena.

Zesílené kmity z laděného tónového generátoru nyní vedeme na doutnavku – nejlépe přes tužkový usměrňovač (připojeno na anodu přes $C=1\mu F$), abychom dostali ostřejší světelné záblesky, a doutnavkou osvětlujeme kotouč, otáčející se v šeru. Ladíme-li na příklad tón fis^1 , musíme ladicími prvky oscilátoru manipulovat tak dlouho, až příslušné značky na kotouči (podle přiložené šablony) se budou jevit, jako by stály (nepřesností narýsovaných značek se mírně pohybují na místě). Směr rozladění od správné hodnoty – zda výše či níže – poznáme podle směru stroboskopicky se pohybujících značek. Značky kotouče jsou určeny pro jednu čárkovanou oktávu. Při ladění tónu této oktávy uvidíme značky ve stejném počtu jako u stojícího kotouče. Při ladění dvakrát čárkované oktávy postupujeme stejně, uvidíme však dvakrát tolik značek. Podobně u tříkrát čárkované oktávy bychom viděli čtyřikrát více značek atd. U vyšších oktáv se již ladění špatně „čte“ pro příliš husté značky – zdánlivě viděné stroboskopicky. Pro nižší oktávy než jednu čárkovanou platí stejný počet značek – vidíme ob jednu, ob dvě, ob čtyři atd.

Při stanovení velikosti indukčnosti nebo kapacity u oscilátoru typu LC nám k rychlému výpočtu dobře poslouží pátý sloupec tabulky II. Známe-li třeba indukčnost, pak pro kterýkoliv tón stanovíme potřebnou kapacitu v μF dělením v tabulce uvedené konstanty k danou indukčností v H. Na příklad máme tlumivku o indukčnosti 10 H a hledáme, jak velký kondensátor k ní máme připojit, abychom dostali kmitočet tónu



Obr. 47. Krystodyn.

*) Kotouč i šablonu možno si vyžádat u autora – Erich Schmalz, Stalinova ul. 1385, Louny.

du“ různá. Příklad spojení jednoduchého elektronického nástroje přímo s gramoradiem je na obr. 49 – klávesnice zasunuta v dolní části gramoskříně (na titulní straně je klávesnice vysunuta ke hře).

Schema oscilátoru tohoto amatérského nástroje je na obr. 50. V principu je to nesymetrický multivibrátor podobného zapojení jaké bylo uvedeno v 10. čísle Amatérského radia 1954 [26]. Zde je však použito elektronky ECH21, v níž je hexoda zapojena jako trioda.

Elektronka je napájena žhavicím i anodovým napětím přímo z přijímače, na jehož gramozdířky je výstup oscilátoru připojen.

Výška tónů (kmitočet oscilátoru) je vedle členů R a C dána hlavně hodnotami odporů R_l zařazovanými klávesovými spinači S_l (v obr. 50 mylně označeny R_c a S_e).

S uvedenými hodnotami součástek vyšly velikosti ladicích odporů R_l většinou kolem $100\ \Omega$ (u nejvyšších tónů nižší, u hlubších vyšší), byly zhotoveny z odporové šňůry (kordelu). Přesné hodnoty, které byly nastaveny stroboskopicky, jsou závislé na hodnotách elektronky. Proto je, zejména po výměně elektronky, možno kmitočet zhruba nastavit kondensátory C_2 a C_4 a odpory R_2 a R_3 , jemněji na R_4 , R_1 a C_1 a nejjemněji reostatem R_5 . Těmito hodnotami – zvláště C_2 – nastavíme také celkový kmitočet oscilátoru na správný tónový rozsah nástroje.

U popsaného modelu je celkem 34 kláves od c do a^2 ($130,81 - 880,00\text{ Hz}$). Spínače byly použity ze známých výprodejních přepínacích skříněk (20 spínačů za Kčs 11,—).

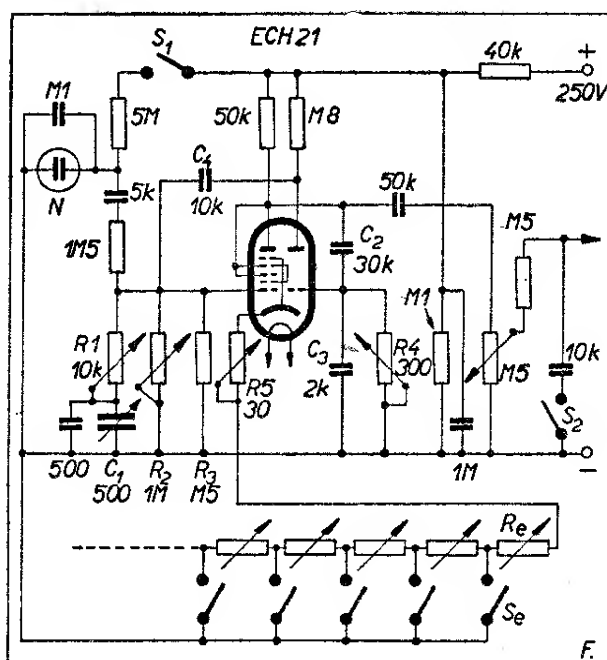
Tremolo vytváří oscilátor s doutnavkou N (malá signální) a vypíná se spínačem S_1 . Hlasitost se řídí na výstupu potenciometrem $0,5\text{ M}\Omega$, jehož nastavení prakticky nemá zpětný vliv na výšku tónu (proti očekávání!). Spínačem S_2 se zapojuje paralelní kondensátor $10\ 000\text{ pF}$, který potlačuje vyšší harmonické a dává přednesu temnější charakter – je to tedy jediný rejstřík tohoto jednoduchého nástroje.



Obr. 49. Konstrukce jednoduchého elektronického nástroje umístěná v gramoradiu. Klávesnice je zasunuta. Na titulní straně je fotografie téhož přístroje s vysunutou klávesnicí.

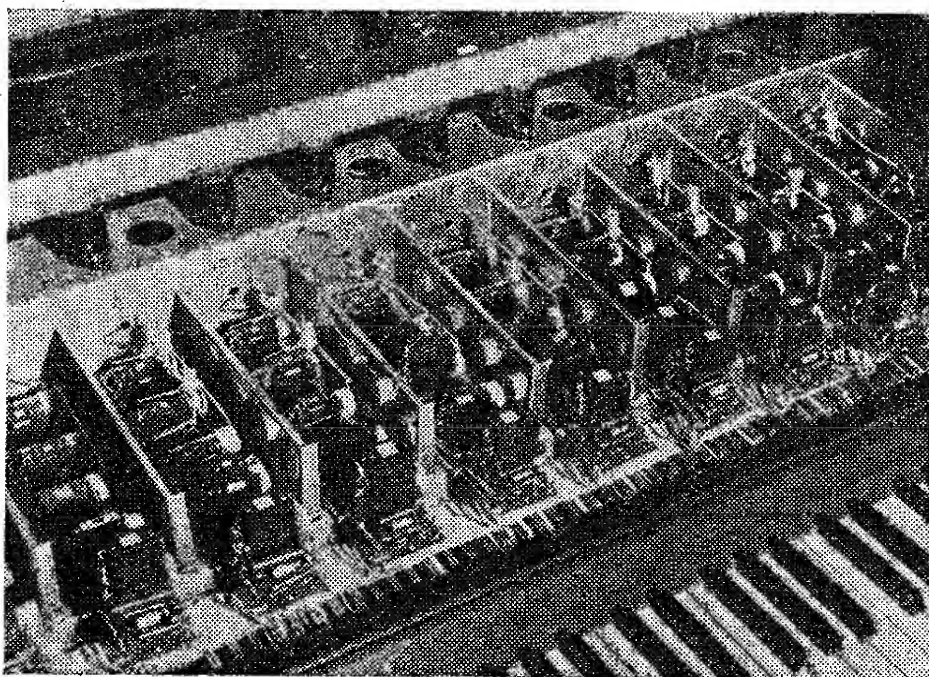
V praktickém provedení – viz obrázek na titulní straně časopisu – jsou regulátor hlasitosti a spínače tremola a rejstříku umístěny na destičce na levé straně klávesnice.

Hra na nástroj je vzhledem k jednohlasému systému velmi jednoduchá a i nehuďebník se snadno naučí hrát „jedním prstem“ písničky. Přes jednoduchost a jen jeden rejstřík je zvuk nástroje velmi zajímavý, zejména se zapnutým tremolem.



Obr. 50. Schema monofonního oscilátoru.

Ukázka amatérského provedení elektronických varhan, které zkonstruoval s. Vybalka ze Žnojma a které byly vystaveny na III. celostátní výstavě radioamatérských prací. Tóny jsou vyráběny doutnavkovými generátory. V pozadí elektronky 6N7.



LITERATURA

- [1] Klika: Přehled sdělovací techniky. Sdělovací technika 1953/1, str. 2.
- [2] Schmalz: Proč elektrické hudební nástroje. Dřevo 1956/6, str. 157.
- [3] Musik und Technik. Funk und Ton 1954/4, str. 219.
- [4] Sdělovací technika 1955/12, str. 376.
- [5] Mager: Zur Stratosphäre der Musik per Elektro-Akustik. Funk Magazin 1933/1, str. 5.
- [6] Reinberger: O varhanách. Elektronik 1951/2, str. 50.
- [7] Matějček: Poznámky o elektronické a konkrétní hudbě. Hudební rozhledy 1955/6, str. 294.
- [8] Die elektronische AWB Orgel. Radio Technik (Wien) 1954/11, str. 409.
- [9] Kwasnik: Zur Einführung der Elektronen-Orgel. Instrumentenbau-Zeitschrift 1951/7, str. 90.
- [10] Reinberger: O varhanách. Elektronik 1951/3, str. 76.
- [11] Schmalz: O normalisaci ladění hudebních nástrojů. Dřevo 1956/3, str. 85.
- [12] Merhaut: Nejdůležitější jednotky v akustice. Slaboproudý obzor 1953/5.
- [13] Scheminzky: Die Welt des Schalles. Das Bergland Buch, Salzburg, 1943.
- [14] Jeans: Věda a hudba. Dělnické nakladatelství, Praha 1948.
- [15] Šipovskij: Jakostní nízkofrekvenční zesilovače. Státní nakl. techn. liter., Praha 1954.
- [16] Schreiber: Grundlagen der elektronischen Klangerzeugung. Radio und Fernsehen 1955/22, str. 680.
- [17] Přehled trhu elektr. varhan počátkem roku 1955. Instrumentenbau-Zeitschrift 1955/7.
- [18] Strnad: Elektroakustika I/2 – str. 815. Technicko-vědecké vydavatelství, Praha 1951.
- [19] Meyre-Eppler: Elektrische Klangerzeugung. Dümmler, Bonn 1949.
- [20] Rohlíček: Elektrofonické varhany. Amatérské Radio 1953/5, str. 112.
- [21] Lottermoser: Die fotoelektrische Orgel. Akustische Zeitschrift 1936, str. 193.
- [22] Winkelmann: Trautonium, das neue Musikinstrument. Funk Magazin 1933/5, str. 21.
- [23] Strnad: Doutnavky – str. 43. Elektrotechnický svaz československý, Praha 1947.
- [24] Electronic Engineering 1950/7, str. 277.
- [25] Radio (SSSR) 1954/4.
- [26] Elektronický hudební nástroj. Amatérské radio 1954/10, str. 232.
- [27] Netušil: Frekvence multivibrátoru. Sdělovací technika 1953, str. 254.
- [28] Potterův multivibrátor. Radioamatér 1947, str. 278.
- [29] Šádek: Zdokonalení rázových generátorů. Radioamatér 1947, str. 336.
- [30] Haschkowitsch: Lehrgang Funktechnik. Radio und Fernsehen 1955/1, str. 29.
- [31] Strnad: Elektroakustika I/2, str. 1356. Technicko-vědecké vydavatelství, Praha 1951.

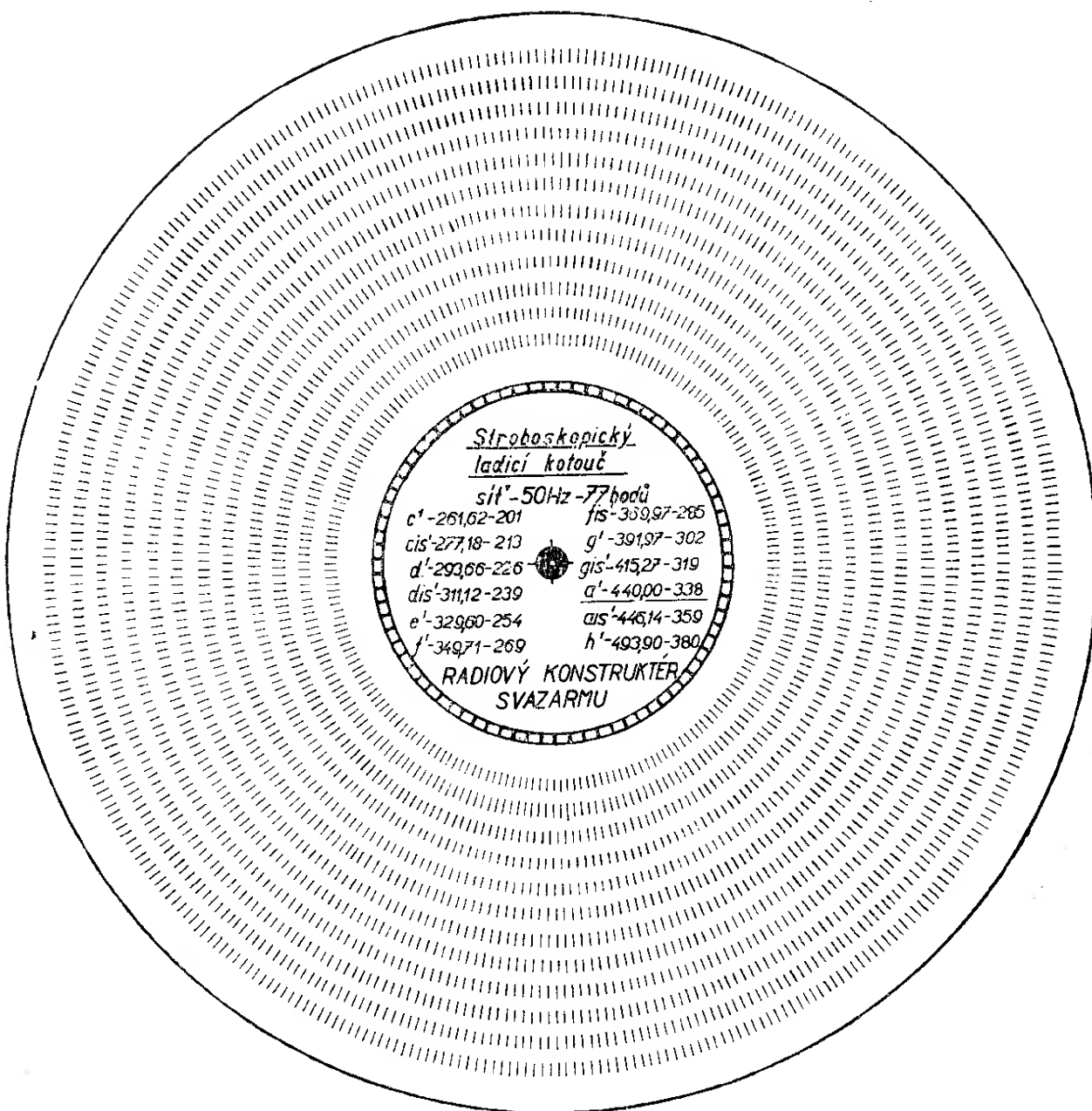
- [32] Vosáhlo: Tónový generátor. Elektronik 1948/10, str. 241.
- [33] Oscilátor s doutnavkou. Radioamatér 1947, str. 130.
- [34] Bode: Bekannte und neue Klänge durch elektrische Musikinstrumente. Funktechn. Monatshefte 1940, str. 67—74.
- [35] Vierling: Eine neue elektrische Orgel. Deutsche Musikkultur 1938/1, str. 289.
- [36] Schreiber: Die Connsonata-Orgel. Radio und Fernsehen 1956/4, str. 107.
- [37] Krivosudský: O konstrukcii elektronického organu. Technická Práca 1953/4, str. 245.
- [38] Horák: Elektronické měření (str. 145). Stát. nakl. technic. liter., Praha 1953.
- [39] Sobotka: Oscilátor RC synchronisovaný automatickým ovládáním fáze. Sdělovací technika 1955/8, str. 239.
- [40] Šimr: Elektrická kytara. Elektronik 1950/2, str. 46 a 6, str. 146.
- [41] Šimr: Housle se snímačem zvuku. Elektronik 1950/6, str. 143.
- [42] Transistoren in praktischer Verwendung. Radio Technik (Wien) 1954/11, str. 395.
- [43] Radio und Fernsehen 1955/17, str. 519.

Tabulka V

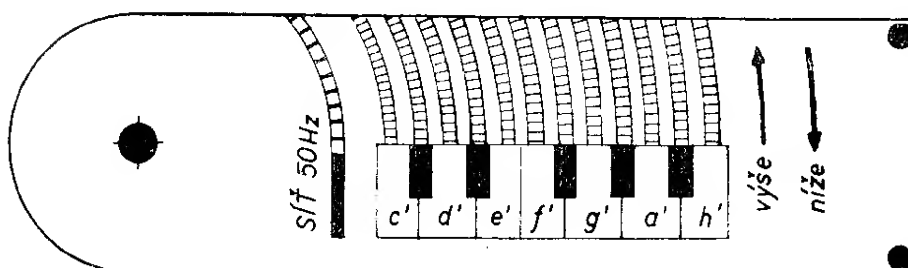
Kmitočty chromatické stupnice vyrovnaného (temperovaného) ladění na základě normálu $a_1 = 440 \text{ Hz}$

Tóny	Enharmonické	Oktáva / kmitočet Hz								
		Sub-kontra	Kontra	Velká	Malá	1 × čárkovaná	2 × čárkovaná	3 × čárkovaná	4 × čárkovaná	5 × čárkovaná
C		16,35	32,70	65,41	130,81	261,62	523,25	1046,50	2092,99	4185,98
CIS	DES	17,32	34,65	69,29	138,59	277,18	554,36	1108,71	2217,42	4434,85
D		18,35	36,71	73,41	146,83	293,66	587,31	1174,62	2349,25	4698,50
DIS	ES	19,44	38,89	77,78	155,56	311,12	622,25	1244,50	2488,99	4977,98
E		20,60	41,20	82,40	164,80	329,60	659,21	1318,42	2636,83	5273,66
F		21,86	43,71	87,43	174,85	349,71	698,41	1396,82	2793,65	5587,30
FIS	GES	23,12	46,25	92,49	184,99	369,97	739,95	1479,90	2959,79	5919,58
G		24,50	49,00	97,99	195,99	391,97	783,95	1567,90	3155,79	6271,58
GIS	AS	25,95	51,91	103,82	207,64	415,27	830,54	1661,09	3322,18	6644,35
A		27,50	55,00	110,00	220,00	440,00	880,00	1760,00	3520,00	7040,00
AIS	B	29,13	58,27	116,54	233,08	466,16	932,32	1864,65	3729,30	7458,59
H		30,87	61,74	123,47	246,95	493,90	987,80	1975,60	3951,20	7902,40

RADIOVÝ KONSTRUKTÉR SVAZARMU, návody a plány Amatérského radia. Vydává Svaz pro spolupráci s armádou ve Vydavatelství časopisů ministerstva národní obrany, Praha II, Vladislavova 26. Redakce Praha I, Národní tř. 25 (Metro). Telefon 23-30-27. Řídí František SMOLÍK s redakčním kruhem (Josef ČERNÝ, Vladimír DANCÍK, Antonín HÁLEK, Ing. Miroslav HAVLÍČEK, Karel KRBEC, Arnošt LAVANTE, Ing. Jar. NAVRÁTIL, Václav NEDVĚD, Ing. Ota PETRÁČEK, Josef POHANKA, laureát státní ceny, Antonín RAMBOUSEK, Josef SEDLÁČEK, mistr radioamatérského sportu a nositel odznaku „Za obětavou práci“, Josef STEHLÍK, mistr radioamatérského sportu, Aleš SOUKUP, Vlastislav ŠVOBODA, laureát státní ceny, Jan ŠÍMA, mistr radioamatérského sportu, Zdeněk ŠKODA, Ladislav ZÝKA). Vychází měsíčně, ročně vyjde 10 čísel. Tiskne NAŠE VOJSKO n. p., Praha. Otisk povolen jen s písemným svolením vydavatele. Příspěvky redakce vrací, jen byly-li vyžádány a byla-li přiložena frankovaná obálka se zpětnou adresou. Za původnost a veškerá práva ručí autoři příspěvků. Toto číslo vyšlo 10. března 1957.



Stroboskopický ladicí kotouč.



Šablona k stroboskopickému kotouči.

Tabulka II

Tón	f-Hz	$\omega = 2 \pi f$	ω^2	$k = 10^6/\omega^2$	
2C	16,35	102,68	10 534,18	94,92907	
2Cis	17,32	108,77	11 830,91	84,52435	
2D	18,35	115,24	13 280,26	75,29973	
2Dis	19,44	122,08	14 903,53	67,09819	
2E	20,60	129,37	16 736,60	59,74929	
2F	21,86	137,28	18 845,80	53,06222	
2Fis	23,12	145,19	21 080,14	47,43801	
2G	24,50	153,86	23 672,90	42,24239	
2Gis	25,95	162,97	26 559,22	37,65170	
2A	27,50	172,70	29 825 29	33,52859	
2Ais	29,13	182,94	33 467,04	29,88014	
2H	30,87	193,86	37 581,70	26,60869	
1C	32,70	205,36	42 172,73	23,71200	
1Cis	34,65	217,60	47 349,76	21,11943	
1D	36,71	230,54	53 148,69	18,81513	
1Dis	38,89	244,23	59 648,29	16,76493	
1E	41,20	258,74	66 946,39	14,93732	
1F	43,71	274,50	75 350,25	13,27135	
1Fis	46,25	290,45	84 361,20	11,85379	
1G	49,00	307,72	94 691,60	10,56059	
1Gis	51,91	325,99	106 269,48	9,410039	
1A	55,00	345,40	119 301,16	8,382148	
1Ais	58,27	365,93	133 904,76	7,467994	
1H	61,74	387,78	150 334,55	6,651830	
C	65,41	410,77	168 731,99	5,926558	
Cis	69,29	435,14	189 346,82	5,281313	
D	73,41	461,01	212 530,22	4,705213	
Dis	77,78	488,46	238 593,17	4,191234	
E	82,40	517,47	267 775,20	3,734475	
F	87,43	549,06	301 466,88	3,317113	
Fis	92,49	580,84	337 375,10	2,964059	
G	97,99	615,38	378 692,54	2,640664	
Gis	103,82	651,99	425 090,96	2,352489	
A	110,00	690,80	477 204,64	2,095537	
Ais	116,54	731,87	535 633,70	1,866947	
H	123,47	775,39	601 229,65	1,663257	
c	130,81	821,49	674 845,82	1,481819	
cis	138,59	870,34	757 491,71	1,320146	
d	146,83	922,09	850 249,97	1,176124	
dis	155,56	976,92	954 372,69	1,047808	
e	164,80	1 034,94	1 071 100,80	0,9336189	
f	174,85	1 098,06	1 205 735 76	0,8293691	
fis	184,99	1 161,74	1 349 639,83	0,7409384	
g	195,99	1 230,82	1 514 917,87	0,6601017	
gis	207,64	1 303,98	1 700 363,84	0,5881094	
a	220,00	1 381,60	1 908 818,56	0,5238847	
ais	233,08	1 463,74	2 142 534,79	0,4667368	
h	246,95	1 559,85	2 405 135,72	0,4157769	
c1	261,62	1 642,97	2 699 350,42	0,3704594	
cis1	277,18	1 740,69	3 030 001,68	0,3300328	
d1	293,66	1 844,18	3 400 999,87	0,2940311	
dis1	311,12	1 953,83	3 817 451,67	0,2619548	
e1	329,60	2 069,89	4 284 444,61	0,2334024	
f1	349,71	2 196,18	4 823 206,59	0,2073309	
fis1	369,97	2 323,41	5 398 234,03	0,1852457	
g1	391,97	2 461,57	6 059 326,86	0,1650348	
gis1	415,27	2 607,89	6 801 090,25	0,1470352	
a1	440,00	2 763,20	7 635 274,24	0,1309710	
ais1	466,16	2 927,48	8 570 139,15	0,1166842	
h1	493,90	3 101,69	9 620 480,86	0,1040530	

Tón	f-Hz	$\omega = 2 \pi f$	ω^2	$k = 10^6/\omega^2$	
c2	523,25	3 286,01	10 797 861,72	0,0926109	
cis2	554,36	3 481,38	12 120 006,70	0,0825082	
d2	587,31	3 688,31	13 603 630,66	0,0735098	
dis2	622,25	3 907,73	15 270 353,75	0,0654864	
e2	659,21	4 139,84	17 138 275,22	0,0583489	
f2	698,41	4 386,01	19 237 083,72	0,0519829	
fis2	739,95	4 646,89	21 593 586,67	0,0463100	
g2	783,95	4 923,21	24 237 996,70	0,0412575	
gis2	830,54	5 215,79	27 204 465,32	0,0367587	
a2	880,00	5 526,40	30 541 096,96	0,0327428	
ais2	932,32	5 854,97	34 280 673,70	0,0291709	
h2	987,80	6 203,38	38 481 925,42	0,0259862	
c3	1 046,50	6 572,02	43 191 446,88	0,0231527	
cis3	1 108,71	6 962,70	48 479 191,29	0,0206274	
d3	1 174,62	7 376,61	54 414 375,09	0,0183775	
dis3	1 244,50	7 815,46	61 081 415,01	0,0163716	
e3	1 318,42	8 279,68	68 553 100,90	0,0145872	
f3	1 396,82	8 772,03	76 948 510,32	0,0129957	
fis3	1 479,90	9 293,77	86 374 160,81	0,0115775	
g3	1 567,90	9 846,41	96 951 789,89	0,0103144	
gis3	1 661,09	10 431,64	108 819 113,09	0,00918956	
a3	1 760,00	11 052,80	122 164 387,84	0,00818569	
ais3	1 864,65	11 710,00	137 124 100,00	0,00729266	
h3	1 975,60	12 406,77	153 927 941,83	0,00649655	
c4	2 092,99	13 143,98	172 764 210,24	0,00578823	
cis4	2 217,42	13 925,40	193 916 765,16	0,00515685	
d4	2 349,25	14 753,29	217 659 565,82	0,00459433	
dis4	2 488,99	15 630,86	244 323 784,34	0,00409293	
e4	2 636,83	16 559,29	274 210 085,30	0,00364684	
f4	2 793,65	17 544,12	307 796 146,57	0,00324890	
fis4	2 959,79	18 587,48	345 494 412,75	0,00289440	
g4	3 155,79	19 818,36	392 767 393,09	0,00254604	
gis4	3 322,18	20 863,29	435 276 869,62	0,00229739	
a4	3 520,00	22 105,60	488 657 551,36	0,00204642	
ais4	3 729,30	23 420,00	548 496 400,00	0,00182317	
h4	3 951,20	24 813,54	615 711 767,33	0,00162414	
c5	4 185,98	26 287,95	691 056 315,20	0,00144706	
cis5	4 434,85	27 850,86	775 670 402,74	0,00128921	
d5	4 698,40	29 506,58	870 638 263,30	0,00114858	
dis5	4 977,98	31 261,71	977 294 512,12	0,00102323	
e5	5 273,66	33 118,58	1 096 840 341,22	0,000911710	
f5	5 587,30	35 088,24	1 231 184 568,30	0,000812226	
fis5	5 919,58	37 174,96	1 381 977 651,00	0,000723601	
g5	6 271,58	39 385,52	1 551,219 185,67	0,000653074	
gis5	6 644,35	41 726,52	1 741 102 471,31	0,000574349	
a5	7 040,00	44 211,20	1 954 630 205,44	0,000511604	
ais5	7 458,59	46 839,94	2 193 979 979,20	0,000455793	
h5	7 902,40	49 627,07	2 462 846 076,78	0,000406034	

Tremolo	f-Hz	$\omega = 2 \pi f$	ω^2	$k = 10^6/\omega^2$	
I-4C	4,08	25,62	656,38	1523,5077	
II-3C	8,17	51,31	2632,72	379,8353	
III-3G	12,25	76,93	5918,22	168,9697	